

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Optimización topológica experimental de piezas
obtenidas por fabricación aditiva tipo DLP**

MEMORIA

Autor: Daniel Turmo Cortés
Director: Miquel Casafont Ribera
Convocatoria: Mayo 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Índice

Resumen	5
1. Prefacio	7
1.1. Motivación.....	7
2. Introducción.....	8
2.1. Objetivos del proyecto	8
2.2. Alcance del proyecto	8
2.3. Requisitos del proyecto	8
3. Fundamentos teóricos	9
3.1. Fabricación aditiva tipo DLP	9
3.1.1. Digital Light Processing.....	10
3.2. Optimización topológica.....	12
3.2.1. Formulación del problema de la optimización topológica	13
3.3. Digital Image Correlation	14
3.4. Optimización topológica a partir de DIC	16
3.4.1. Ejemplo de optimización topológica validada con DIC	16
4. Fundamentos prácticos	21
4.1. Ensayo experimental	21
4.2. Extracción del campo de desplazamientos con DIC	24
4.2.1. Adaptación de medidas previa al análisis	29
4.2.1.1. Medidas del lado izquierdo.....	30
4.2.1.2. Medidas del lado derecho	31
4.2.1.3. Medidas del lado superior	32
4.2.1.4. Medidas del lado inferior	33
4.3. Análisis por elementos finitos	34
4.3.1. Simulación en ANSYS APDL	34
4.3.1.1. Comparativa de desplazamientos y deformaciones.....	37
4.3.2. Simulación en ANSYS Workbench	40
4.4. Optimización topológica en ANSYS Workbench	43
Conclusiones	47
Bibliografía.....	49

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado pretende explicar detalladamente los pasos a seguir para poder realizar una optimización topológica experimental en una pieza obtenida por fabricación aditiva gracias a la técnica Digital Light Processing. El proceso requiere una elevada experimentación, aunque también se introducen todos los conceptos teóricos que se consideran necesarios, gracias a las numerosas referencias consultadas. Por otro lado, cabe destacar la utilización de los softwares GOM Correlate, ANSYS Workbench y ANSYS Mechanical APDL, sin los cuales hubiese sido imposible llevar a cabo este proyecto. Además, la pieza utilizada en los ensayos realizados en el laboratorio del Departamento de Resistencia de Materiales se fabricó en la Fundació CIM-UPC, por lo que todo el proceso ha sido desarrollado íntegramente en el entorno cercano del ETSEIB-UPC.

El trabajo se divide en dos partes marcadas. En la primera de ellas, se explican los fundamentos teóricos de la fabricación aditiva, de la técnica DLP, de la optimización topológica y de la técnica Digital Image Correlation. Por otro lado, en la segunda parte, se explica todo el proceso experimental, donde tienen lugar las siguientes fases ordenadas cronológicamente: ensayo experimental de la pieza producida por fabricación aditiva tipo DLP, extracción del campo de desplazamientos con la técnica DIC, análisis y simulación por elementos finitos, y optimización topológica.

1. Prefacio

1.1. Motivación

Cuando me propuse hacer el TFG, contacté con el profesor Miquel Casafont, del departamento de Resistencia de Materiales. Siendo sincero, no tenía en mente ningún ámbito en particular, pero estaba convencido de que me iba a proponer alguna temática interesante y me iba a ayudar durante la realización de este trabajo. Desde un principio, tuve la opción de escoger entre diferentes temas, y finalmente me decanté por este debido al enfoque experimental, pues se trataba de un mundo estudiado por él mismo y por algunos de sus alumnos en diferentes proyectos, pero desde otro punto de vista, lo que me motivó a decidirme rápidamente.

Sin más dilación, pese a no haber escuchado o leído nada relacionado con el tema escogido, me fui adentrando poco a poco en la optimización topológica, concretamente de piezas fabricadas con la innovadora técnica DLP (Digital Light Processing). El hecho de tener que realizar un proceso de una forma novedosa, en el que me podía ir encontrando numerosos e inesperados contratiempos, me hizo decidirme por tirar hacia delante este proyecto.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es encontrar el procedimiento para realizar la optimización topológica experimental de una pieza, en nuestro caso obtenida por fabricación aditiva tipo DLP, utilizando softwares comerciales. Para ello, se han medido los desplazamientos con la técnica DIC en una gran cantidad de puntos de una pieza sometida a una fuerza en un ensayo. Con estos desplazamientos se han podido obtener las fuerzas experimentales sobre la pieza, que han permitido realizar la optimización con éxito. La metodología de ANSYS para realizar la optimización topológica requiere el uso de fuerzas, por lo que la idea original de utilizar sólo el estado de tensiones y deformaciones resultante no es aplicable.

2.2. Alcance del proyecto

Se desea encontrar una metodología para llevar a cabo con éxito la optimización topológica experimental, por lo que algunos aspectos de mejora propuestos posteriormente no corresponden a este proyecto. Además, para realizar este trabajo, se ha profundizado en el aprendizaje de todos los aspectos teóricos de las técnicas utilizadas y se han utilizado diferentes softwares de análisis que han sido de gran ayuda. Por tanto, realizando este proyecto se pretende conocer la técnica DLP, la técnica DIC y la optimización topológica, especialmente de modo experimental.

2.3. Requisitos del proyecto

Para la realización de este proyecto, se han leído diferentes referencias para entrar en materia y poder tener una visión teórica. Posteriormente se ha procedido con toda la parte práctica, lo que ha supuesto tener que aprender a utilizar los softwares GOM y ANSYS, aunque de este segundo ya se tenían conocimientos básicos.

3. Fundamentos teóricos

3.1. Fabricación aditiva tipo DLP

En la actualidad, existen diferentes tecnologías que permiten la fabricación por adición de un objeto tridimensional, el cual es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Este tipo de procesos apenas genera residuos materiales, exige un mecanizado sencillo y permite obtener una pieza o un prototipo a partir de un modelo digital en 3D. Además, se reducen considerablemente los costes, tanto económicos como de tiempo, respecto a otras tecnologías como pueden ser la sustracción, la fundición y el amoldamiento, que siendo también efectivas, son bastante más costosas. Por otro lado, es posible adaptar el prototipo a las especificaciones requeridas, simplemente modificando el modelo digital, por lo que hoy en día es posible fabricar casi todo tipo de formas diferentes para una gran variedad de sectores. Por tanto, se puede asegurar que se trata de una tecnología realmente efectiva y competitiva cuando se necesita fabricar piezas que requieren una personalización, presentan una complejidad geométrica o las cantidades requeridas no son muy altas. Si se cumple una de estas características, o bien una suma de ellas, se trata de un ámbito a tener muy en cuenta. También es cierto que puede ser utilizada juntamente con otras tecnologías, ya que en la mayoría de procesos de fabricación industrial, las piezas pasan por diferentes fases.

En nuestro caso, interesa estudiar la fabricación aditiva que utiliza un proyector DLP, que tiene como principales ventajas la posibilidad de realizar piezas con un nivel de detalle inigualable con una velocidad de impresión alta. Por otro lado, se trata de una técnica con varios inconvenientes, entre los que destaca su complejo postprocesado, en el que se han de limpiar los restos de resina líquida y los soportes creados para su sujeción durante el proceso, y el material se ha de dejar endurecer. Además, cabe destacar que los fotopolímeros son frágiles por naturaleza, aunque pueden ser mecanizados sin problemas, ya que sus características se adaptan perfectamente a nuestros ensayos en el laboratorio. Por último, se debe apuntar que este proceso está normalmente orientado a la fabricación de piezas pequeñas, y hay que seguir los protocolos de seguridad

estipulados para que las radiaciones ultravioletas y los componentes del material no resulten nocivos para nuestra salud.

Cuando se mezclan la fabricación aditiva y la optimización topológica, una de las dificultades que se nos presenta en la fase del diseño es el mallado. Contra más refinado sea, la pieza resultante puede ser más óptima y compleja, siempre asegurando que con la malla escogida sea posible encontrar la topología óptima. En ocasiones surgen problemas relacionados con este tema, por lo que el refinamiento ha de ser máximo solo en los casos en los que se trabaje con componentes de tamaños muy pequeños.

Por último, se quiere apuntar que los resultados de las piezas obtenidas en las simulaciones de optimización topológica no son los que se envían a fabricar, ya que en estos se han de realizar algunas operaciones, como suavizar curvas, eliminar trozos de material, regular la forma de los agujeros, etc.

3.1.1. Digital Light Processing

Este sistema de fabricación aditiva 3D incorpora un proyector DLP similar a los proyectores de vídeo convencionales para generar patrones que fotopolimerizan selectivamente finas capas de material. La óptica del proyector produce un tamaño de pixel en la superficie de polimerización de aproximadamente 40 μm . Este proceso comienza con un diseño en 3D de la geometría, que es discretizada en capas delgadas, las cuales se representan como imágenes binarias. Entonces las imágenes se muestran durante el tiempo preciso para fotopolimerizar cada capa del objeto 3D creado.

Los sistemas de impresión 3D DLP pueden utilizar una superficie fija o libre para la construcción del objeto 3D, tal y como se muestra en la Figura 1.

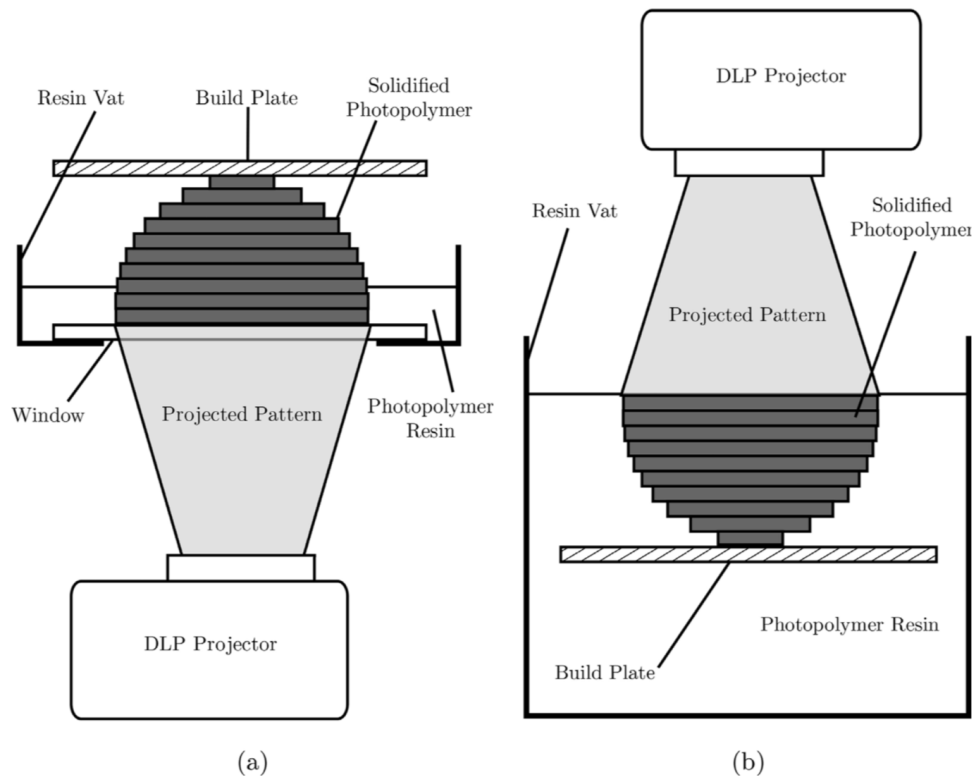


Figura 1. Esquema de la fabricación DLP con superficie fija (a) y superficie libre (b)[5]

En el método de superficie fija (Figura 1.a.), el objeto 3D se fabrica al revés, endureciendo selectivamente finas capas de material fotopolímero, situadas entre una ventana situada en el fondo de una cuba de resina y la capa previamente endurecida. Este método permite un control lineal sobre el espesor de la capa y es bastante popular en la impresión 3D.

Por otro lado, en el método de superficie libre (Figura 1.b.), el objeto 3D se fabrica boca arriba mediante el endurecimiento selectivo de capas de polímero situadas en la parte superior de la capa anterior. Se ha de tener en cuenta el efecto de la inhibición del oxígeno, que puede reaccionar con los radicales generados por el fotoiniciador, inhibiendo drásticamente la polimerización. Para compensar este efecto, la cuba suele estar contenida dentro de una atmósfera inerte. Cabe destacar que este método requiere técnicas más avanzadas que en el caso anterior.

3.2. Optimización topológica

En el campo del diseño de elementos estructurales, igual que en otros ámbitos, uno de los aspectos clave a tener en cuenta es la eficiencia. La estructura ideal es aquella que es sometida a unas cargas, unas condiciones de contorno y unas restricciones concretas, y tiene un comportamiento de máxima eficiencia. El diseño incluye información sobre el tamaño, la forma y la topología, y optimizando estas características se puede obtener la estructura deseada. En definitiva, el objetivo es el aligeramiento estructural manteniendo intactas las funcionalidades mecánicas.

Se observan claramente tres tipos de optimizaciones posibles según el aspecto del problema del diseño estructural que se quiera abordar: de forma, de tamaño y topológica, tal y como se muestra en la *Figura 2*.

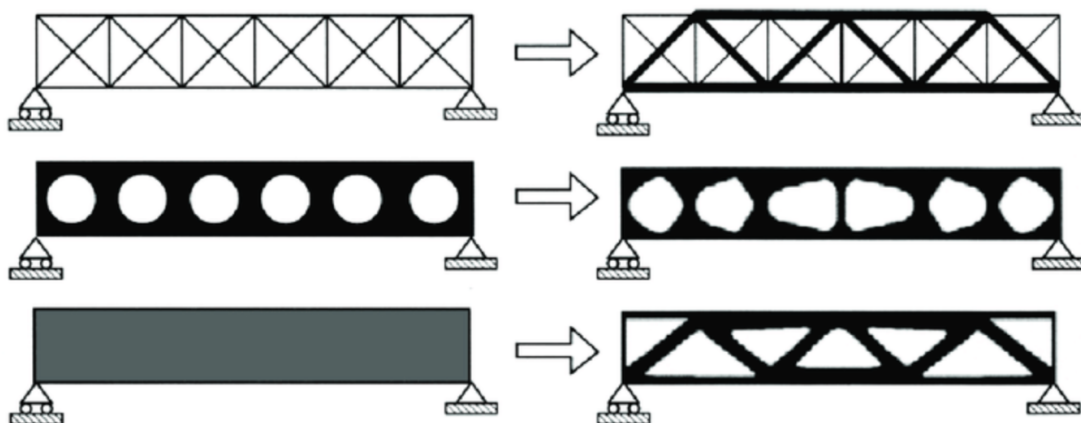


Figura 2. Comparación ilustrativa de las optimizaciones de tamaño, de forma y topológica [2]

Por un lado, en un problema de dimensionado, el objetivo es encontrar el grosor o el área óptima de los componentes de la estructura (que suelen ser barras), siendo estas las variables de diseño, y quedando el dominio del diseño y las variables de estado fijadas desde el principio del proceso. Por otro lado, la optimización de forma pretende encontrar la mejor forma del dominio, que es también la variable de diseño, y durante el proceso se modifica la forma de los agujeros ya diseñados. Por último, la optimización topológica, que es la que nos interesa estudiar en profundidad en este proyecto desde un enfoque

experimental, determina la conectividad óptima del diseño, y define la distribución de la forma de la estructura formando nuevos agujeros.

En el caso de la optimización topológica, existen cuatro métodos diferentes, tal y como se puede ver en la referencia [6]. El primero de ellos, el método de la homogeneización, trata el problema con elementos finitos y realiza una aproximación de la densidad para cada uno de ellos. El segundo, el método del material sólido e isotrópico con penalización, es el que utiliza el software ANSYS Workbench, y utiliza un factor de penalización y un valor límite para que las densidades tengan valor igual a 0 ó 1, y así solucionar las carencias del primero de los métodos. El tercero, el método de la optimización estructural evolutiva, también se basa en los elementos finitos, pero guía al software por un camino de evolución particular. Por último, el *Level Set Method* mueve directamente las fronteras del dominio sin utilizar los elementos finitos.

3.2.1. Formulación del problema de la optimización topológica

En este trabajo no se pretende explicar toda la teoría y los métodos relacionados con la optimización topológica, ya que esta será tratada bajo un enfoque más experimental. En los problemas de optimización topológica se suele considerar un elemento mecánico que ocupa un dominio y está sujeto a fuerzas, tal y como se muestra en la *Figura 3*.

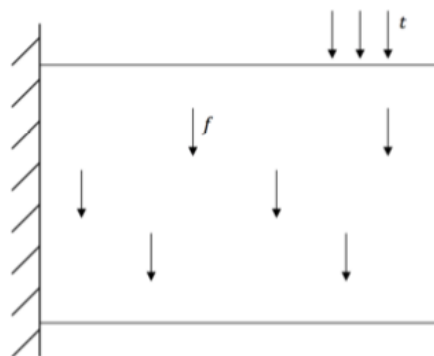


Figura 3. Fuerzas de volumen y de superficie sobre el elemento mecánico [6]

El problema puede estar sujeto a diferentes restricciones de diseño, como podría ser no sobrepasar unos valores de tensiones y deformaciones concretos, aunque normalmente la única regla será mantener el porcentaje de volumen escogido por el usuario. Por tanto, se puede decir que la optimización topológica busca eliminar el porcentaje de material deseado manteniendo la rigidez al máximo posible.

3.3. Digital Image Correlation

En los proyectos de ingeniería y construcción las tensiones y las deformaciones son parámetros críticos. Sin embargo, medir estos parámetros fuera de un laboratorio con las técnicas tradicionales resulta complicado. La técnica Digital Image Correlation, también conocida como DIC, permite realizar medidas de una forma simple, precisa y económica, por lo que debe ser tenida en cuenta a la hora de estudiar los comportamientos de los materiales en aplicaciones de la vida cotidiana.

La técnica DIC trabaja comparando fotografías digitales de un componente, una estructura o algún tipo de sólido en diferentes fases de deformación. Estas fotos se pueden realizar con una gran variedad de cámaras convencionales. Obviamente, contra más calidad tenga la cámara, mejor análisis se obtendrá, pero es posible utilizar desde una cámara Réflex a una cámara deportiva GoPro. Siguiendo la evolución de bloques de píxeles, el sistema es capaz de medir los desplazamientos y construir así los campos de desplazamientos y tensiones requeridos.

En la actualidad, esta técnica se utiliza para examinar una amplia gama de cosas, entre las cuales destacan las siguientes: evolución y uniformidad de las deformaciones en ensayos de diferentes materiales, propagación de las grietas, determinación del punto de rotura, detección de daños en materiales compuestos, detección de desviaciones estructurales, mapeo de deformaciones a altas temperaturas e incluso análisis dinámico de vibraciones.

Un ejemplo que ayuda a entender el funcionamiento de esta técnica es el uso del DIC para medir la evolución de las grietas en una viga. Tal y como se puede apreciar en la *Figura 4*, a simple vista solo vemos una grieta larga justo en el medio.

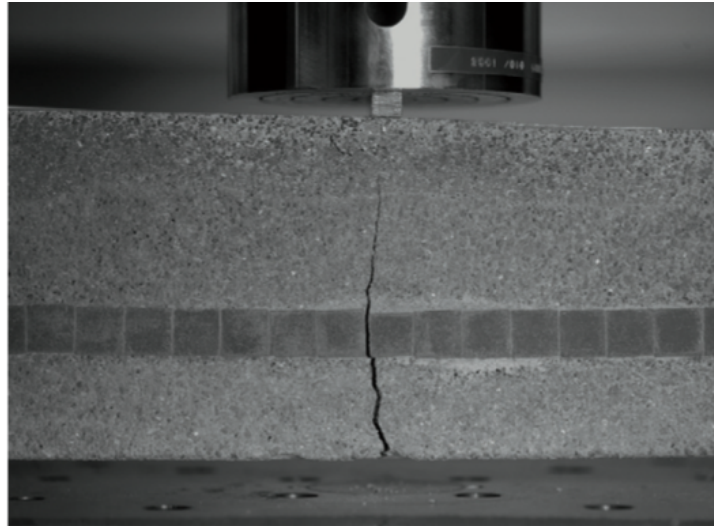


Figura 4. Grieta observada a simple vista en una viga [10]

Sin embargo, tomando fotografías de la viga en diferentes fases, sobre todo antes y después de la aparición de la grieta predominante, se pueden apreciar las grietas potenciales que van apareciendo, tal y como muestra la *Figura 5*, y que son difíciles de ver con el ojo humano, para poder así controlar su evolución.

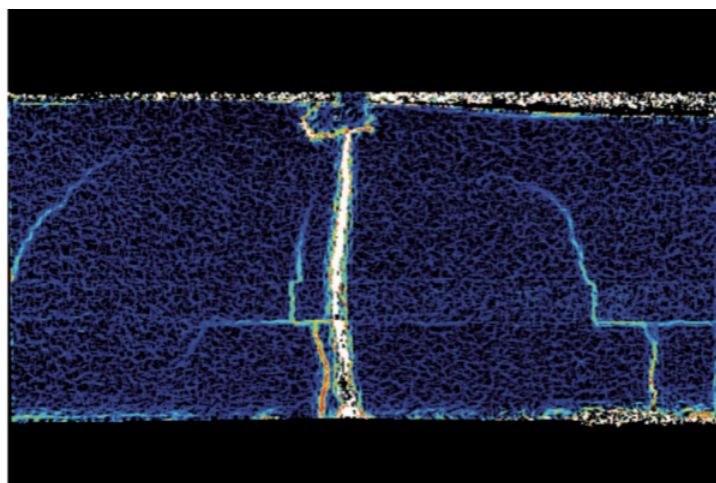


Figura 5. Mapa de deformaciones obtenido mediante DIC que muestra grietas no visibles [10]

Aunque se trata de una técnica a tener muy en cuenta, todavía existen retos importantes para mejorar la calidad de las medidas obtenidas, sobre todo fuera de un laboratorio. En el exterior, es posible que factores ambientales puedan provocar cambios en las superficies, como por ejemplo oxidación o abrasión, y esto interfiera en la precisión.

3.4. Optimización topológica a partir de DIC

Se ha podido comprobar la escasez de artículos acerca de la optimización topológica experimental realizada a partir de mediciones con DIC, lo que justifica la dificultad a la hora de encontrar información teórica relacionada con esta mezcla de técnicas. Sin embargo, sí que es frecuente encontrar artículos o estudios donde el DIC es utilizado para validar los resultados obtenidos en la optimización topológica.

Cuando se utiliza el ANSYS Workbench para realizar un análisis o una simulación por elementos finitos, es bastante sencillo poder obtener los gráficos de las deformaciones, las tensiones y los desplazamientos. Además, con el GOM también se pueden sacar estos gráficos, por lo que usar el DIC para validar los resultados de ANSYS es una opción a tener en cuenta. Sin embargo, en nuestro caso lo que se busca es utilizar los desplazamientos obtenidos con GOM para iniciar la optimización topológica, y cuando se ha querido hacer esto, se ha podido comprobar de primera mano que este tipo de optimizaciones requiere la utilización de fuerzas, y es aquí donde ha surgido uno de los mayores conflictos de este proyecto.

3.4.1. Ejemplo de optimización topológica validada con DIC

En el caso de la cubierta mostrada en la *Figura 6*, se quiere validar la metodología de diseño y entender el comportamiento mecánico resultante al aplicar una fuerza de tracción a través de los agujeros existentes. Se trata de un caso de especial interés, ya que escenifica un caso común en el que se combinan la optimización topológica y la técnica DIC, donde ésta sirve principalmente para validar los resultados.



Figura 6. Cubierta ensayada a tracción [11]

Para simplificar el proceso, se analiza con ANSYS Workbench un cuarto de la cubierta. Además, se aplican las características del material y el mallado correspondiente para poder realizar el análisis pertinente. Por último, el software permite obtener los gráficos deseados, y en nuestro caso, la *Figura 7* muestra la distribución de tensiones de Von Mises.

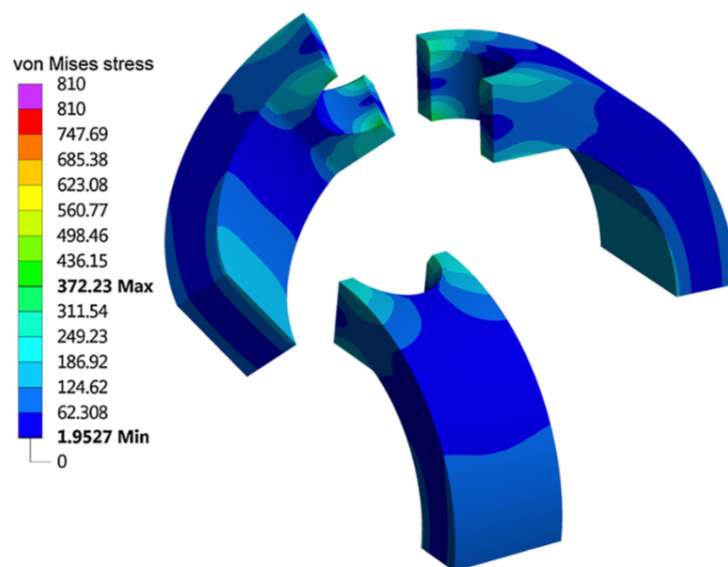


Figura 7. Gráfico de la tensión de Von Mises en un cuarto de la cubierta [11]

A continuación, se realiza la optimización topológica, que pretende minimizar la masa sin que varíen las funcionalidades mecánicas de la pieza. Para ello, el software utiliza en este caso el método de la homogenización, que no es lo habitual, el cual permite asignar a los elementos finitos una densidad característica en el rango de valores comprendido entre 0 y 1, y dependiendo del porcentaje de masa que se desee reducir, se mantienen las porciones con densidad cercana a 1 y se eliminan las partes con densidad cercana a 0. Por tanto, en la *Figura 8* se aprecia el aspecto final de la pieza, donde claramente se puede ver que mantendrá su forma original, pero se originarán numerosos agujeros pequeños a lo largo de toda la estructura. En definitiva, las partes azuladas son las que se mantendrán una vez la pieza esté optimizada, y las rojizas se eliminarán.

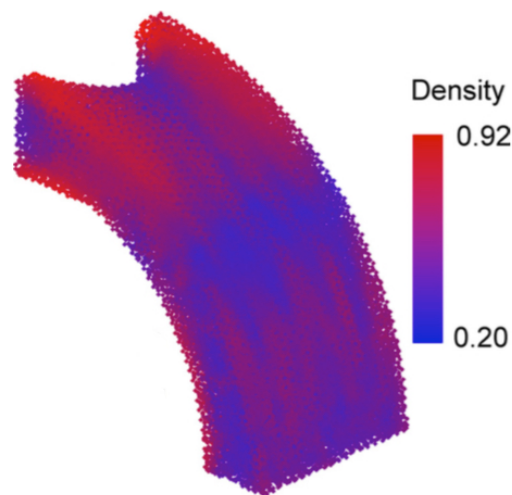


Figura 8. Gráfico de la distribución óptima de la densidad de la cubierta [11]

Luego, tal y como se puede apreciar en las siguientes figuras, *Figura 9* y *Figura 10*, la pieza se irá aproximando a su diseño final, donde la masa se habrá reducido en torno a un 53 % respecto del diseño inicial, y estará lista para poder ser producida mediante fabricación aditiva, que puede ser de tipo DLP según el material que se escoja.

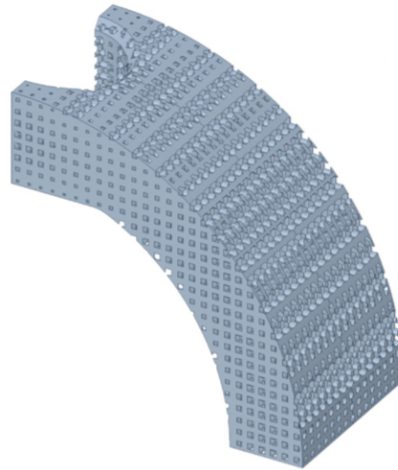


Figura 9. Aspecto de una parte de la cubierta con los agujeros [11]

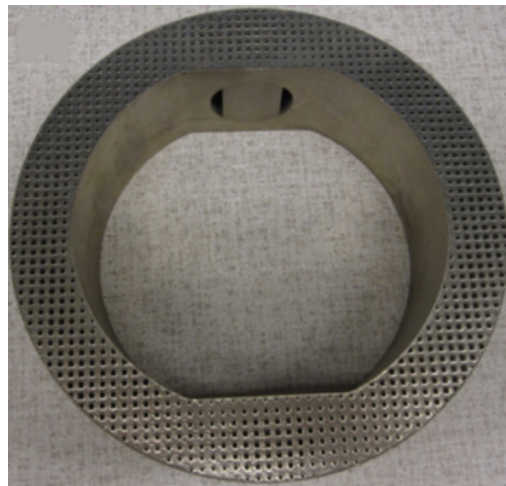


Figura 10. Diseño final de la cubierta producida por fabricación aditiva [11]

Por otro lado, para poder validar los resultados del proceso, se realizan unos ensayos de la pieza final ya fabricada en un laboratorio preparado para dicha tarea. En la *Figura 11* se puede observar la preparación que se ha de llevar a cabo para realizar un ensayo de estas características. Cabe destacar que todos y cada uno de los componentes que aparecen se utilizaron para realizar nuestro propio ensayo, siguiendo las pautas correspondientes.

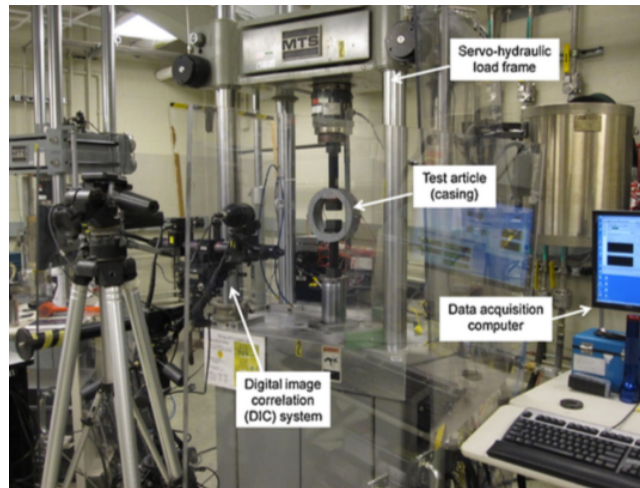


Figura 11. Configuración típica de ensayo mecánico con DIC [11]

Entonces, con la aplicación de estos ensayos se puede validar si la pieza será capaz de soportar los esfuerzos necesarios. Tal y como se puede apreciar en la *Figura 12*, el DIC permite medir los desplazamientos de la pieza desde el perfil deseado. En la fotografía de la izquierda, la pieza está siendo sometida a una fuerza que apenas le genera desplazamientos. Sin embargo, en la fotografía de la derecha, la pieza empieza a experimentar importantes deformaciones. Por tanto, se intuye que el DIC es una herramienta muy útil para analizar si una pieza será capaz de soportar unas tensiones y deformaciones originadas por unas fuerzas o presiones aplicadas.

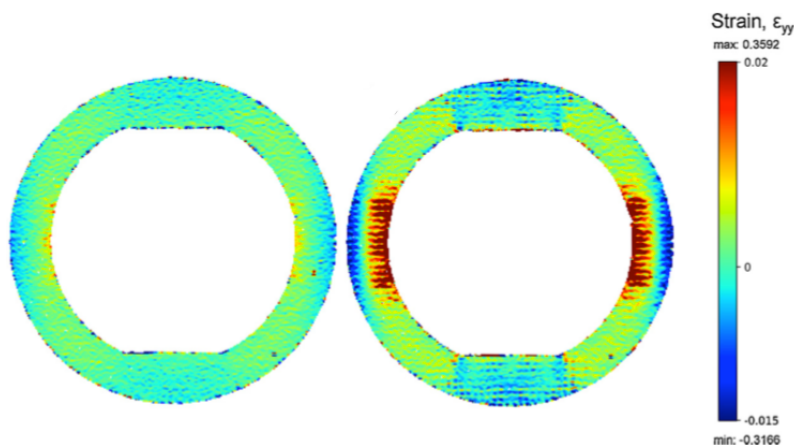


Figura 12. Gráfico de deformaciones de la cubierta obtenido por DIC [11]

4. Fundamentos prácticos

4.1. Ensayo experimental

Para realizar el ensayo en el laboratorio del departamento de Resistencia de Materiales del ETSEIB, se encarga en la Fundación CIM una pieza de material fotopolímero obtenida mediante fabricación aditiva tipo DLP. Se trata de un material ortótropo, ya que sus propiedades elásticas varían según la dirección de estudio. Sin embargo, para desatascar el proyecto se considera que el material es isotrópico y que tiene un módulo elástico de 500 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,48. En procesos futuros sería conveniente poder estimar con más precisión estas propiedades, lo que serviría únicamente para mejorar los resultados. Las medidas nominales de la pieza son 118x29x10 mm, aunque lo que realmente importa es que la relación anchura/altura sea aproximadamente igual a 4, ya que es un ejemplo típico de la literatura de la optimización topológica.

En la siguiente *Figura 13*, se muestra un croquis de la pieza. A continuación, en la *Tabla 1* se muestran todas las medidas exactas expresadas en mm. Las medidas 1 y 2 corresponden a la longitud; las medidas 3, 4 y 5 corresponden a la altura; mientras que las medidas 6, 7, 8, 9, 10 y 11 corresponden al grosor o profundidad.

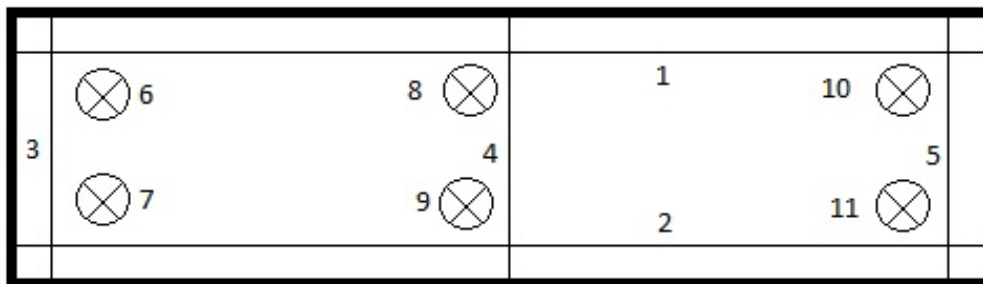


Figura 13. Croquis de la pieza

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
117,07	117,70	28,78	28,88	28,99	9,94	8,92	10,57	9,95	6,82	6,43

Tabla 1. Medidas del croquis de la pieza [mm]

Estas medidas han sido posibles gracias a que el fabricante ha utilizado una cubeta adecuada a la pieza requerida. Sin embargo, se observa claramente que las medidas no son regulares, ya que con la ayuda de un pie de rey se puede apreciar que los costados superior e inferior no miden lo mismo, la altura varía ligeramente a lo largo de la longitud, y que la profundidad de la pieza es diferente en el centro y en los costados. Por otro lado, cabe precisar que la pieza tiene una altura aproximada de 30mm para así tener la posibilidad de fabricar las piezas optimizadas en el futuro, ya que sino el margen de maniobra para su fabricación es muy reducido.

Por otro lado, en la siguiente *Figura 14*, se observa un esquema del ensayo a flexión realizado, donde se aprecian claramente los dos apoyos y la fuerza aplicada en la sección central. Finalmente, los apoyos se sitúan a 100 mm debido a las dimensiones de la pieza, aunque lo ideal hubiese sido a 120 mm.

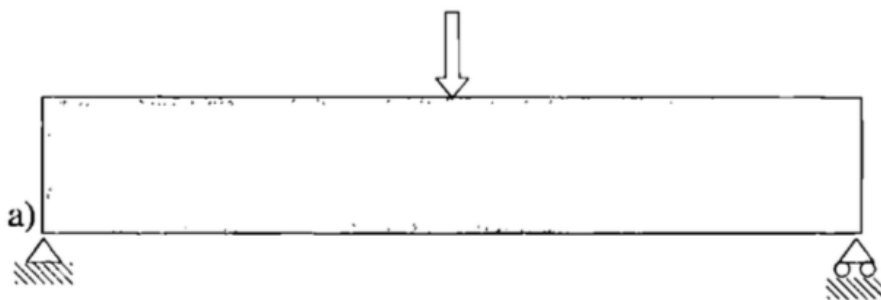


Figura 14. Esquema del ensayo a flexión de la pieza [9]

Para la realización del ensayo, se dispone del material y la maquinaria existente en el laboratorio. Destaca la utilización de dos ordenadores, el primero de los cuales, el que se ve en la *Figura 15*, permite controlar la fuerza aplicada y la velocidad del ensayo, la cual es constante todo el tiempo y de valor igual a 1.3 mm/min.

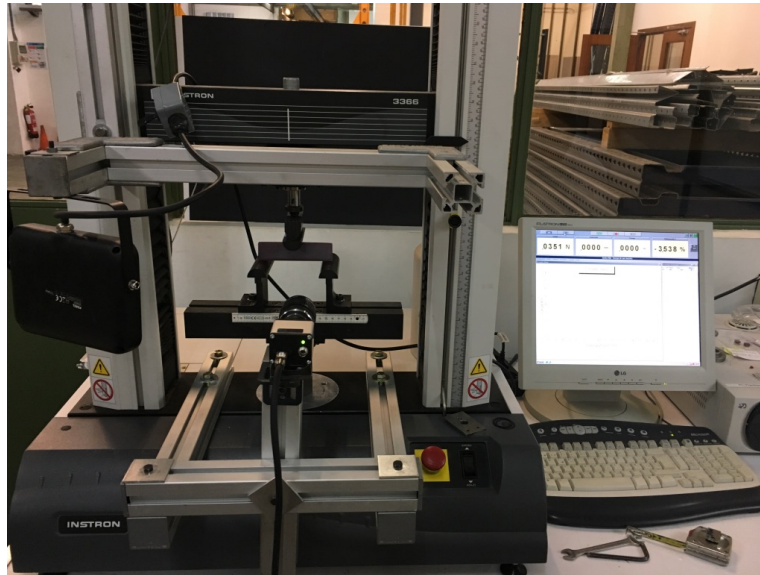


Figura 15. Escenario del ensayo a flexión de la pieza

Por su parte, el otro ordenador disponible, el cual se puede observar en la *Figura 16*, es el encargado de controlar la cámara de fotos. Esta capta imágenes cada 100 N para posteriormente poder ser analizadas con el software GOM Correlate, que utiliza la técnica DIC. Cabe destacar que solo se trabaja con la mitad de la pieza para simplificar el proceso, escogiendo así la parte derecha porque se observan desperfectos de fabricación en la parte izquierda. Además, la cámara no permitía enfocar con nitidez el total de la pieza.

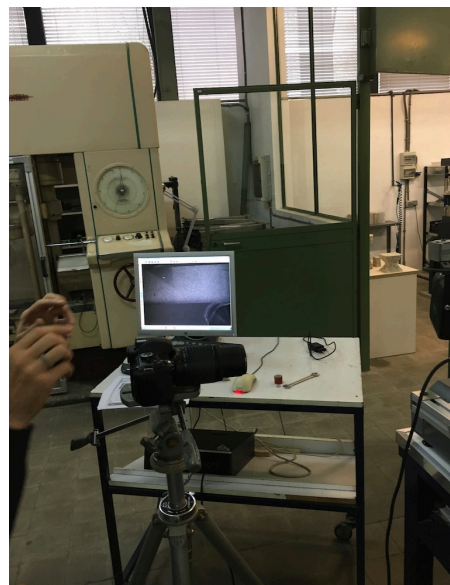


Figura 16. Cámara de fotos controlada por ordenador que capta los desplazamientos de la pieza

Por último, en la *Figura 17*, se observa la pieza después de su rotura, con una fuerza aplicada de unos 950 N, transcurridos unos 6 minutos desde el inicio del ensayo.



Figura 17. Pieza ensayada después de su rotura

4.2. Extracción del campo de desplazamientos con DIC

Una vez realizado el ensayo en el laboratorio, se obtienen las fotografías de la pieza que han sido tomadas cada 100 N de fuerza aplicada, y permiten obtener los desplazamientos en los ejes x-y para posteriormente obtener las deformaciones y tensiones de la pieza, e introducirlas en el análisis con elementos finitos realizado con ANSYS. Cabe destacar que el estado de tensiones y deformaciones es de la cara delantera de la pieza, que en parte viene influido por la irregularidad de la cara trasera, donde la variación del grosor tiene su influencia.

Para medir los desplazamientos en ambos ejes, se ha utilizado la versión gratuita del software GOM Correlate, que utiliza la técnica DIC. Esta versión tiene bastantes limitaciones, lo que ha ralentizado considerablemente el proceso, y bajo mi punto de vista, sería un punto a favor poder contar con la versión de pago.

En las siguientes figuras, *Figura 18* y *Figura 19*, se muestra el estado de la pieza justo en el inicio y en el instante en el que se han medido los desplazamientos, el cual es un punto a mitad de camino entre el origen y la rotura de la pieza.



Figura 18. Pieza en el instante inicial del ensayo



Figura 19. Pieza en el instante en el que se miden los desplazamientos máximos

En definitiva, para poder medir los desplazamientos en los ejes x-y se han insertado las fotografías obtenidas durante el ensayo en el software mencionado anteriormente. Se han tomado manualmente 51 puntos para la altura y 121 para la longitud, anotando sus coordenadas y desplazamientos, y simulando lo que se preveía que iban a ser los nodos, aunque finalmente estos datos son aproximados para sacar los desplazamientos en puntos equidistantes. Tal y como se puede leer en la referencia [6], se obtienen resultados más próximos a la literatura típica de optimización topológica cuando se divide la altura en 50 elementos finitos, y no en 100, por ejemplo. Por otro lado, la anchura se ha dividido en 120 elementos finitos, al considerarse que es un poco más del doble que la altura, y se ha intentado seguir el mismo patrón. En el caso del lado derecho, se ha dejado un margen respecto al extremo de la pieza, ya que había puntos que al deformarse la pieza desaparecían de la fotografía y resultaba imposible medir el desplazamiento. En los laterales, la coordenada x tendría que ser constante, mientras que en los lados superior e inferior la coordenada y es la que debería ser siempre igual.

En las siguientes figuras, *Figura 20* y *Figura 21*, se aprecian los campos de desplazamiento x-y respectivamente. Cabe apuntar que se ha definido la esquina inferior izquierda como origen de coordenadas. Además, el eje x es positivo hacia la derecha y el eje y es positivo hacia arriba. En el caso del campo de desplazamiento en x, se observa claramente que las zonas con tono verdoso apenas sufren desplazamiento, mientras que las zonas rojizas experimentan un ligero desplazamiento positivo y las zonas azuladas un ligero desplazamiento negativo. Por otro lado, en el caso del campo de desplazamiento en y, se observa que todos los desplazamientos son negativos, y que contra más a la izquierda esté la coordenada mayor será su valor. Este comportamiento es lógico, ya que a la derecha del todo la pieza está en contacto con el soporte, mientras que a la izquierda del todo es el punto medio de la pieza, lugar donde es aplicada la fuerza.

A continuación, destacar que en caso de que se hubiese trabajado con la versión de pago, este proceso se ve acelerado considerablemente, ya que toda la

información necesaria se puede exportar en un Excel automáticamente, sin necesidad de ir eje por eje, lado por lado, punto por punto. Además, apuntar que las medidas obtenidas con el GOM no están escaladas, por lo que es necesario adaptarlas a nuestra pieza, lo que se realiza con una simple operación matemática.

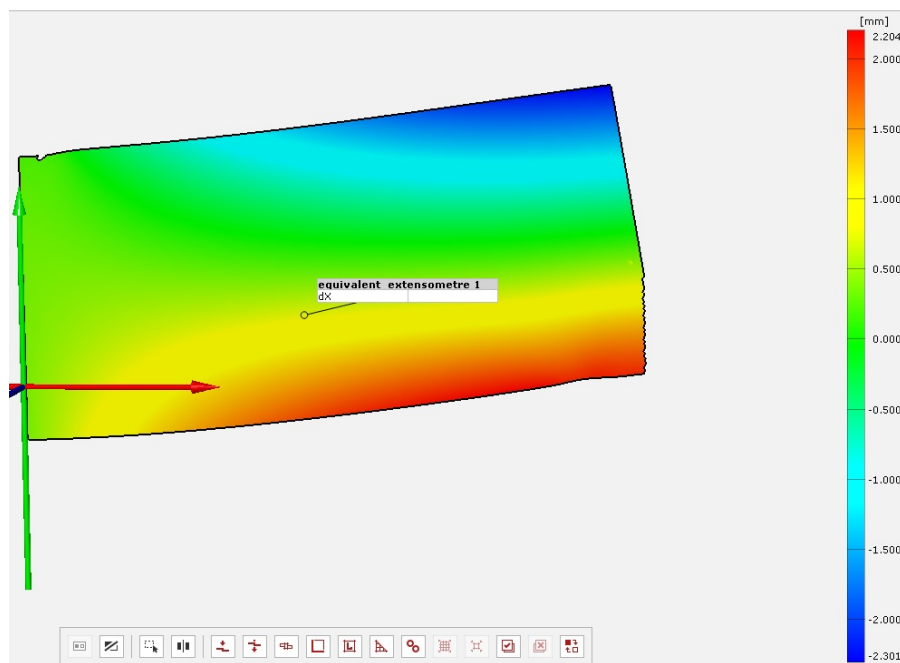


Figura 20. Campo de desplazamiento de la pieza en el eje x obtenido con GOM

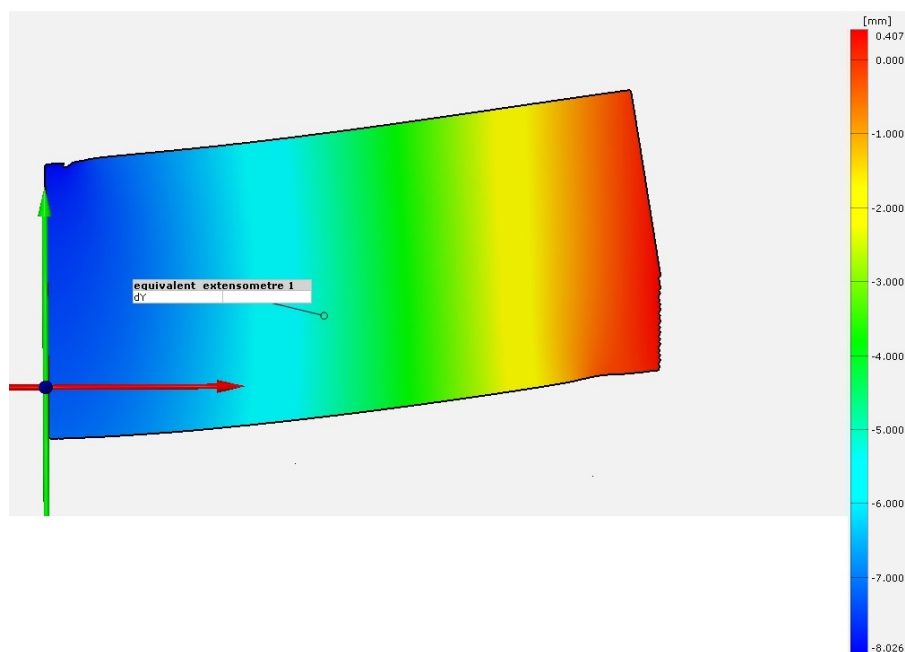


Figura 21. Campo de desplazamiento de la pieza en el eje y obtenido con GOM

Por último, se incluyen la *Figura 22* y *Figura 23*, donde se pueden apreciar las deformaciones en los ejes x-y respectivamente. Estas deformaciones se han obtenido con el GOM, y posteriormente serán comparadas con las obtenidas con el ANSYS cuando se realice el análisis por elementos finitos. Los tonos azulados corresponden a deformaciones negativas y los rojizos a positivas, mientras que las zonas verdosas apenas sufren deformación. Por otro lado, decir que no se incluye el gráfico de deformación x-y porque el software GOM libre no permite obtenerlo.

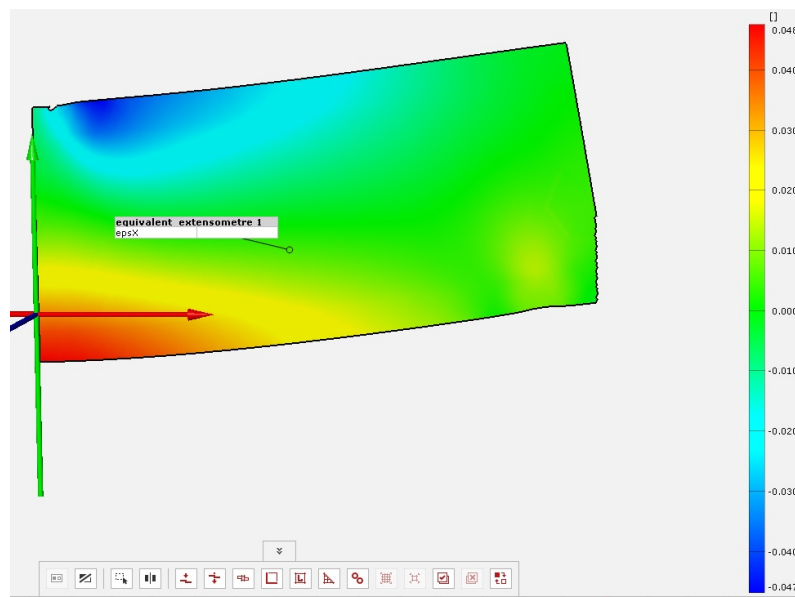


Figura 22. Deformación de la pieza en el eje x obtenida con GOM

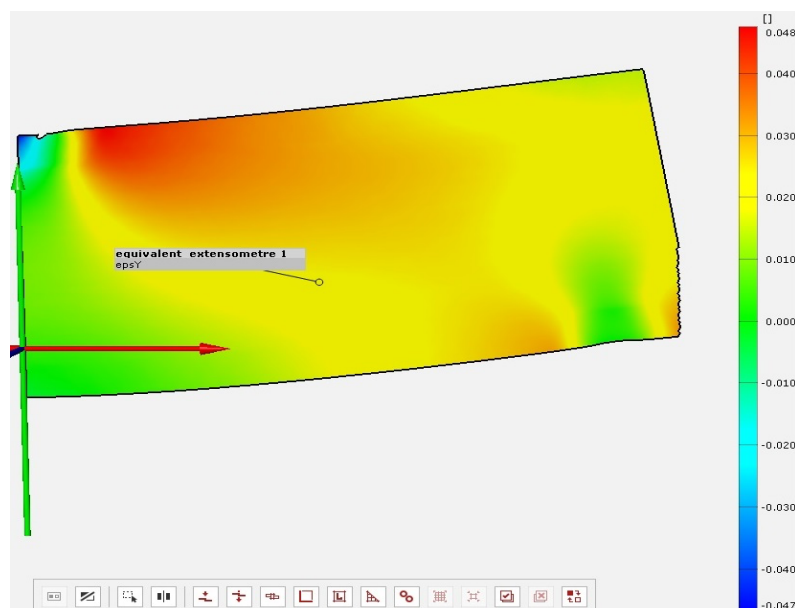


Figura 23. Deformación de la pieza en el eje y obtenida con GOM

4.2.1. Adaptación de medidas previa al análisis

Una vez obtenidas todas las medidas con el software GOM, es necesario realizar las operaciones oportunas para arreglar la información que se tiene, de modo que pueda ser empleada correctamente en el análisis por elementos finitos. El primer paso de todos, tal y como se ha dicho anteriormente, es escalar todas las medidas de acuerdo a la pieza. Cabe destacar que finalmente, en el análisis se trabaja con una pieza de 28,935 mm de altura y 57,267 mm de anchura. La altura es el promedio de las distancias 4 y 5; mientras que la anchura es un promedio de la mitad de las longitudes 1 y 2, restando además una pequeña distancia debido al margen dejado en la experimentación, ya que tal y como se ha explicado previamente, si se apura el margen derecho, algunas medidas es imposible obtenerlas, ya que desaparecen de las fotografías conforme avanza el tiempo. Además, el grosor con el que se trabaja finalmente es igual a 8,442 mm, lo que es la cantidad resultante de hacer la media de las medidas 8, 9, 10 y 11, que tal y como se puede apreciar en la *Figura 6* y en la *Tabla 1*, son las medidas de las profundidades del lado derecho de la pieza, que es el que finalmente se estudia.

Durante el proceso se ha fijado la coordenada x en los lados laterales y la coordenada y en los lados superior e inferior. Además, se ha obtenido una línea de regresión polinómica de grado 6 con coeficientes de 15 cifras a partir de las posiciones y los desplazamientos obtenidos, para poder hallar los desplazamientos en las posiciones que se deseen con una precisión adecuada a lo que demanda el proyecto. Esto ha sido realizado para poder dividir la altura o la anchura en distancias iguales, según corresponda, ya que así todos los elementos finitos tienen las mismas dimensiones, lo que simplifica y facilita el proceso. Por último, destacar que se ha creído conveniente adjuntar las diferentes líneas de regresión obtenidas durante el proceso, además de explicar que coordenada es fijada y que coordenada es dividida.

4.2.1.1. Medidas del lado izquierdo

En este caso se fija la coordenada x con un valor igual a 0, mientras que la coordenada y se va incrementando con un valor de 0,578. Este valor se obtiene dividiendo la altura entre 50. Además, el desplazamiento en ambos ejes se obtiene con las ecuaciones expresadas en los siguientes gráficos, *Gráfico 1* y *Gráfico 2*. Cabe destacar que en este lado los desplazamientos únicamente vienen definidos por la coordenada y, ya que la coordenada x siempre vale lo mismo.

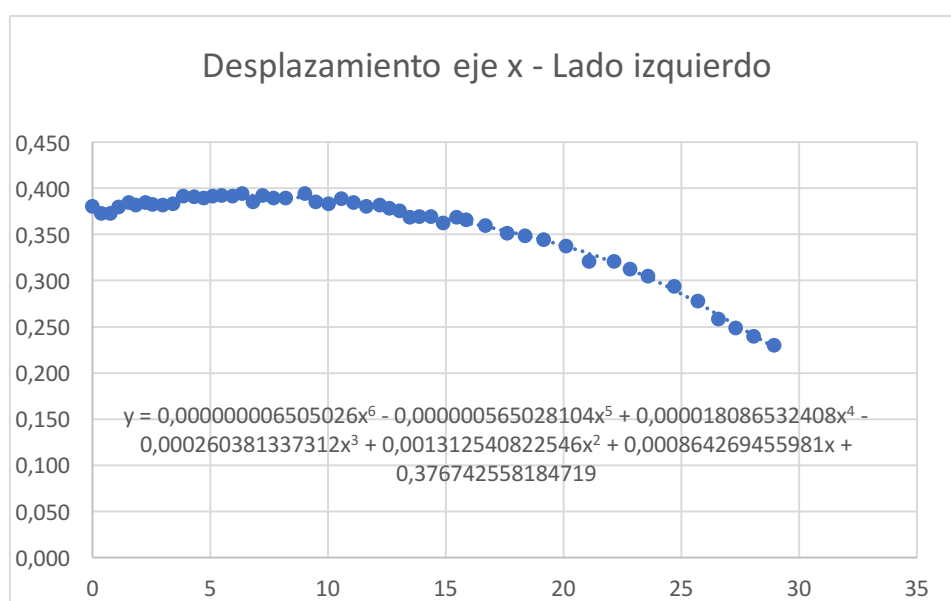


Gráfico 1. Desplazamiento en el eje x del lado izquierdo [mm]

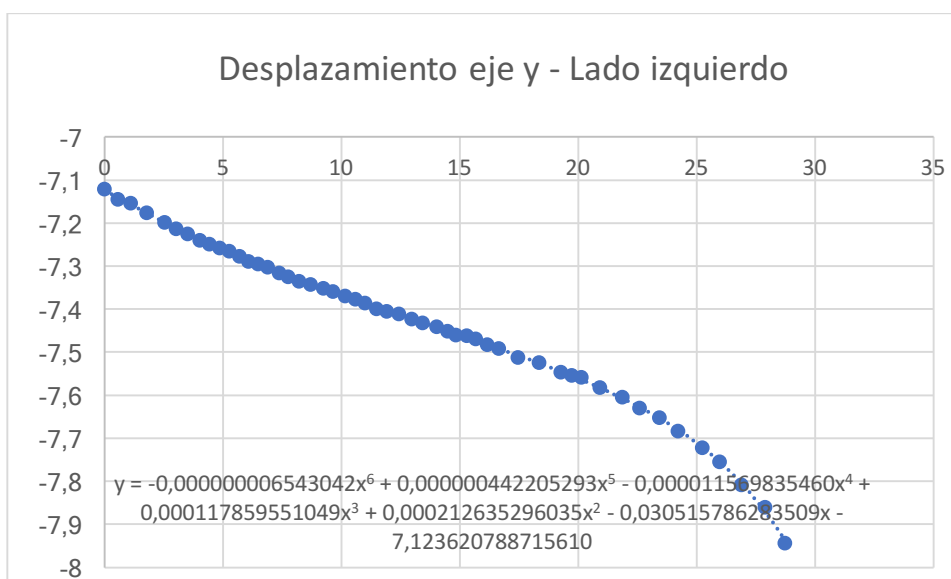


Gráfico 2. Desplazamiento en el eje y del lado izquierdo [mm]

4.2.1.2. Medidas del lado derecho

En este caso se fija la coordenada x con un valor igual a 57,267, mientras que la coordenada y se va incrementando con un valor de 0,578. Este valor se obtiene dividiendo la altura entre 50. Además, el desplazamiento en ambos ejes se obtiene con las ecuaciones expresadas en los siguientes gráficos, *Gráfico 3* y *Gráfico 4*. Cabe destacar que en este lado los desplazamientos únicamente vienen definidos por la coordenada y, ya que la coordenada x siempre vale lo mismo.

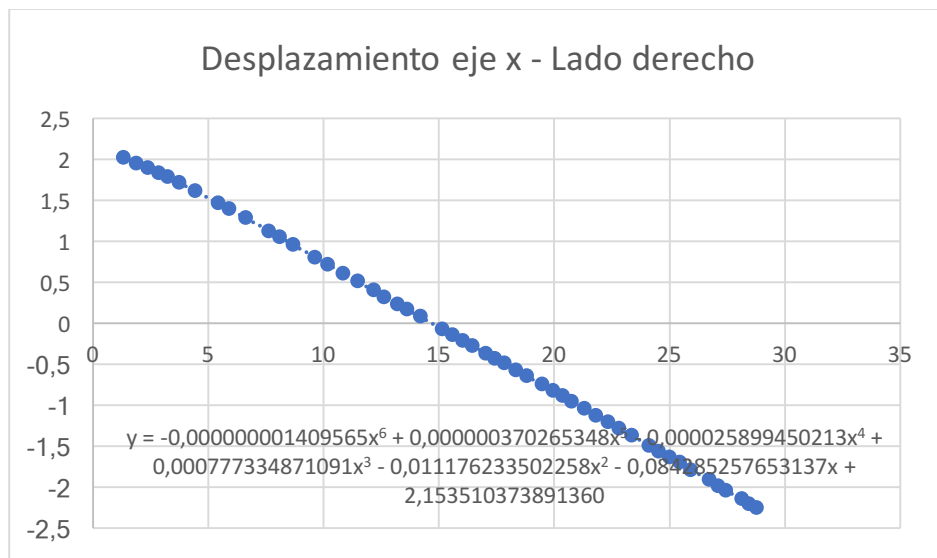


Gráfico 3. Desplazamiento en el eje x del lado derecho [mm]

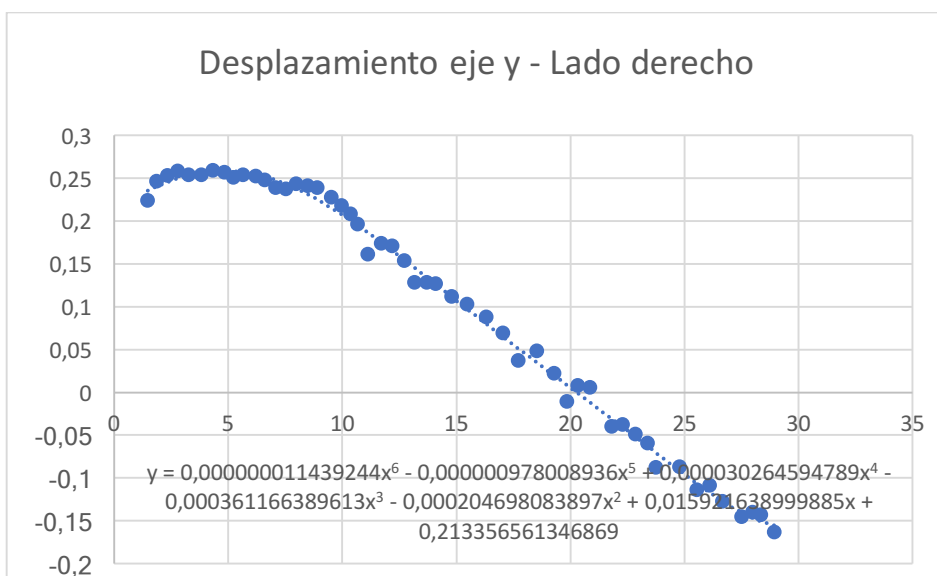


Gráfico 4. Desplazamiento en el eje y del lado derecho [mm]

4.2.1.3. Medidas del lado superior

En este caso se fija la coordenada y con un valor igual a 28,935, mientras que la coordenada x se va incrementando con un valor de 0,477. Este valor se obtiene dividiendo la anchura entre 120. Además, el desplazamiento en ambos ejes se obtiene con las ecuaciones expresadas en los siguientes gráficos, *Gráfico 5* y *Gráfico 6*. Cabe destacar que en este lado los desplazamientos únicamente vienen definidos por la coordenada x, ya que la coordenada y siempre vale lo mismo.

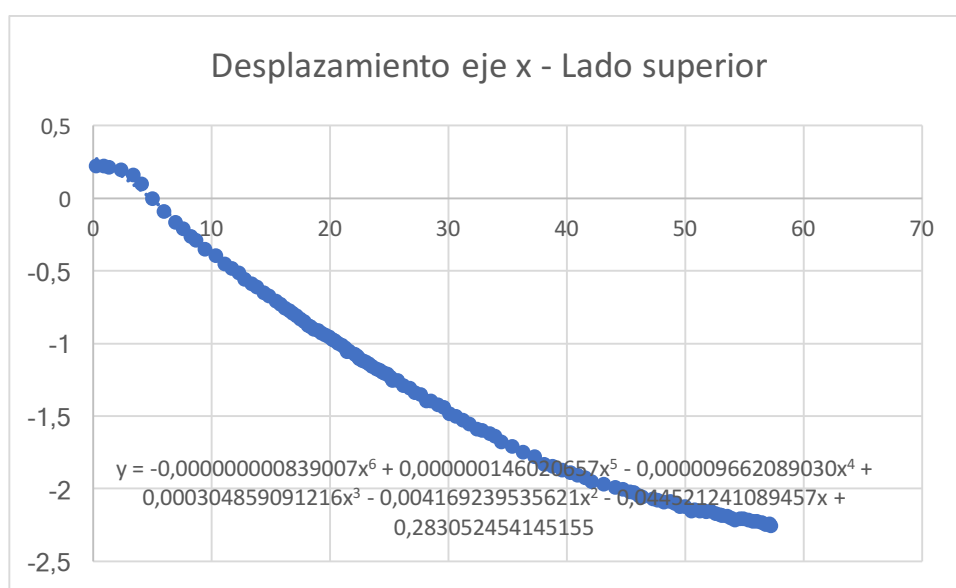


Gráfico 5. Desplazamiento en el eje x del lado superior [mm]

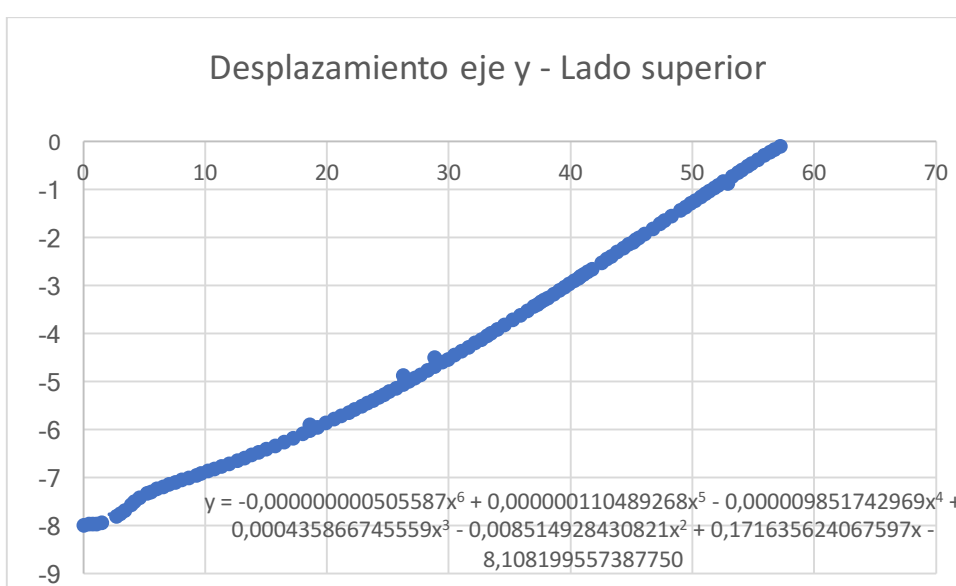


Gráfico 6. Desplazamiento en el eje y del lado superior [mm]

4.2.1.4. Medidas del lado inferior

En este caso se fija la coordenada y con un valor igual 0, mientras que la coordenada x se va incrementando con un valor de 0,477. Este valor se obtiene dividiendo la anchura entre 120. Además, el desplazamiento en ambos ejes se obtiene con las ecuaciones expresadas en los siguientes gráficos, *Gráfico 7* y *Gráfico 8*. Cabe destacar que en este lado los desplazamientos únicamente vienen definidos por la coordenada x, ya que la coordenada y siempre vale lo mismo.

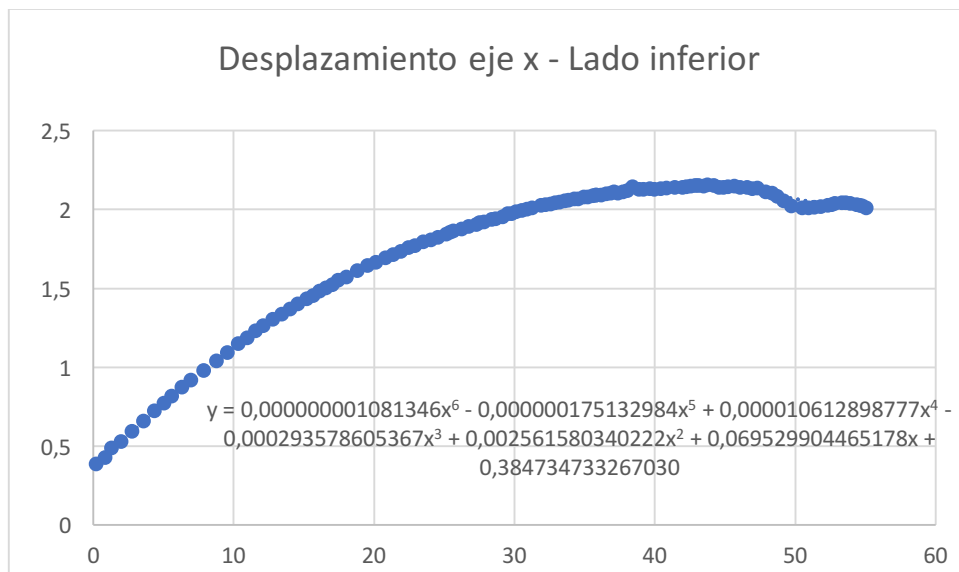


Gráfico 7. Desplazamiento en el eje x del lado inferior [mm]

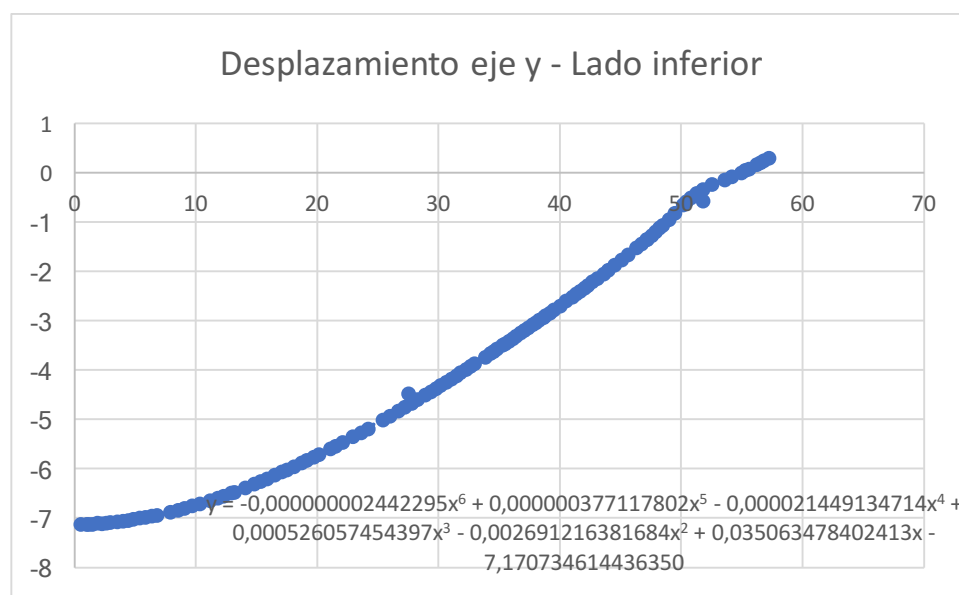


Gráfico 8. Desplazamiento en el eje y del lado inferior [mm]

4.3. Análisis por elementos finitos

4.3.1. Simulación en ANSYS APDL

Después de adaptar las medidas para hacer más sencillo el análisis por elementos finitos, se crea una casilla de *Excel* por cada punto del contorno de la pieza. Este recuadro incluye 4 datos importantes en cada caso, como son la coordenada x, la coordenada y, el desplazamiento en el eje x y el desplazamiento en el eje y. Una vez se tiene esta línea para todos los puntos existentes, todos estos datos, junto a una serie de comandos y funciones específicas, son copiados en una macro, que posteriormente será utilizada en ANSYS Mechanical APDL para obtener una simulación muy realista del desplazamiento sufrido por la pieza durante el ensayo. Además, se obtienen gráficos de los desplazamientos y de las deformaciones, los cuales son comparados con los anteriormente obtenidos con el GOM Correlate.

Primero de todo, tal y como se puede apreciar en la *Figura 24*, se introducen los comandos necesarios para crear directamente todos los nodos de la pieza. Existe un nodo para cada uno de los puntos de la pieza, siendo o no del contorno, por lo que en total se tienen 121×51 en cada lado, para un total de 6.171×2 , lo que da una cantidad total igual a 12.342. Cabe destacar que la cara trasera es equivalente a la cara delantera, con una separación igual a 8,442 mm. Esta cifra ha sido aproximada para poder aligerar los cálculos, ya que si varía el grosor de la pieza el proceso es más complejo, y es el resultado de hacer la media de las medidas 8, 9, 10 y 11 ya referenciadas previamente en el apartado 4.1.

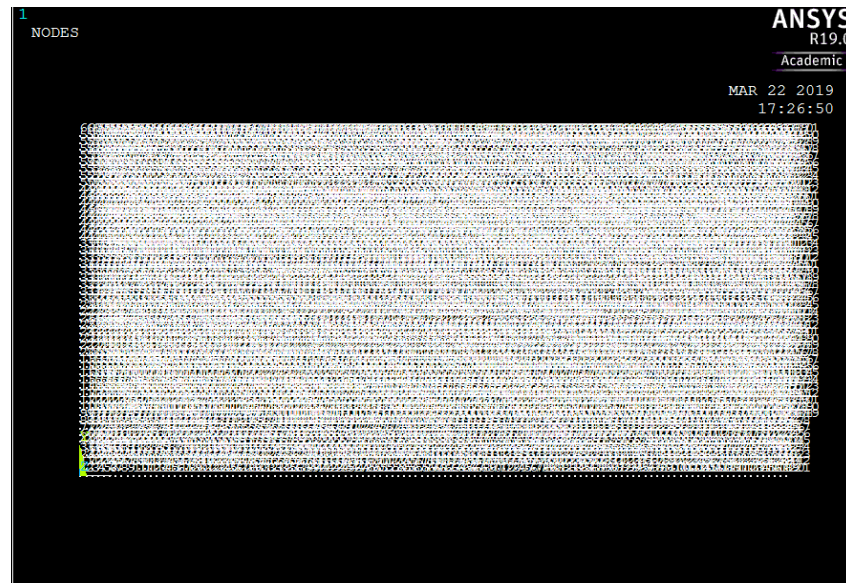


Figura 24. Creación de todos los nodos en ANSYS APDL

A continuación, en la siguiente *Figura 25*, se pueden observar todos los nodos, apreciándose claramente la existencia de una cara delantera y una trasera, separadas por un grosor. Uniendo los nodos se obtendrán los diferentes sólidos resultantes de realizar el mallado necesario para poder aplicar el método de elementos finitos.

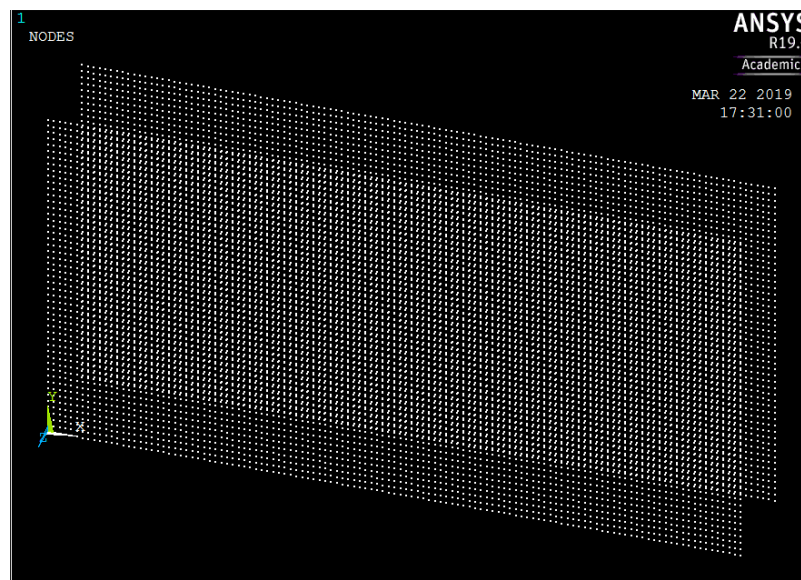


Figura 25. Vista de las dos caras de la pieza con los nodos ya creados en ANSYS APDL

Posteriormente, se utilizan los comandos oportunos para realizar el mallado de la pieza, utilizando elementos de volumen SOLID 185, que es un sólido estructural homogéneo. Inicialmente se tenía el problema que el software utilizaba tetraedros en vez de hexaedros para hacer el mallado, aunque esto finalmente se soluciona con la macro. Pese a que se hubiese querido trabajar en 2D con elementos planos al tratarse de un problema de tensión plana, no ha resultado posible, ya que luego la geometría se importa a Workbench, donde lo habitual es trabajar con elementos de volumen en 3D. Por último, se aplican los desplazamientos en ambos ejes, tal y como se observa en la siguiente *Figura 26*.

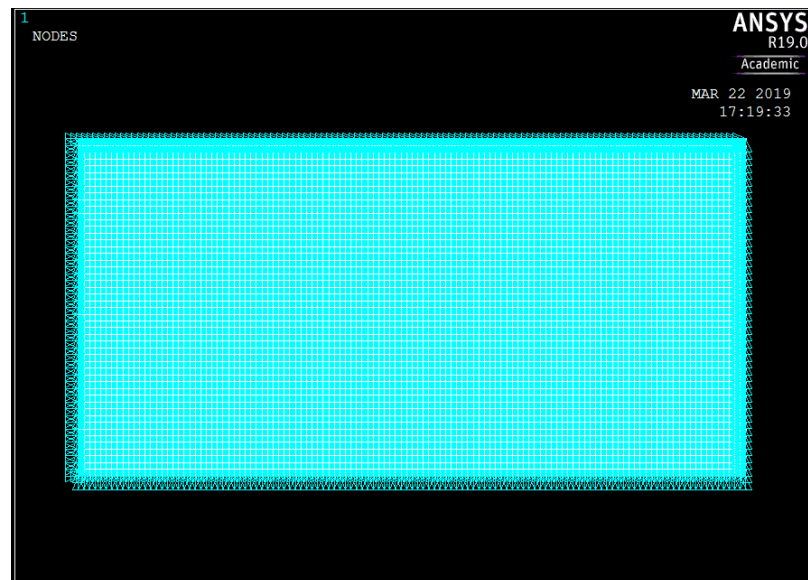


Figura 26. Pieza mallada con los desplazamientos aplicados en ANSYS APDL

Por otro lado, cabe destacar que otro de los motivos por los que se ha trabajado primero con ANSYS APDL es porque no se tenían los conocimientos necesarios para poder pasar los desplazamientos a fuerzas directamente en Workbench, donde el método de optimización topológica implementado requiere el uso obligatorio de fuerzas. Seguidamente se han tenido que obtener las fuerzas de reacción en todos los puntos del contorno, que son los que definen el comportamiento de la pieza. Estas fuerzas de reacción son iguales a las fuerzas que causan los desplazamientos impuestos, pero de signo opuesto. Por tanto, se puede afirmar que la idea original de pasar directamente al modelo las

deformaciones y tensiones, obtenidas a partir de los desplazamientos medidos con DIC, no es válida.

En la siguiente *Figura 27* se puede ver una simulación de cómo se comporta la pieza al aplicar los desplazamientos provocados por la fuerza en cuestión. Recalcar que solamente se ha trabajado con la mitad derecha de la pieza, tal y como se ha explicado previamente en este trabajo.

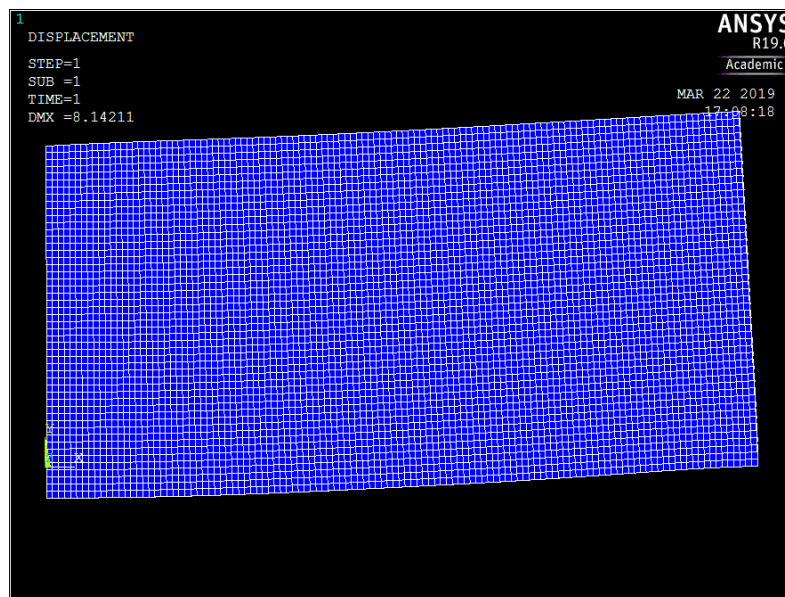


Figura 27. Simulación de los desplazamientos en ANSYS APDL

4.3.1.1. Comparativa de desplazamientos y deformaciones

Después de realizar la simulación con ANSYS APDL, se considera oportuno comparar los gráficos de los desplazamientos y deformaciones obtenidos con los previamente hallados con el GOM utilizando la técnica DIC, para comprobar que el proceso va por buen camino. Apuntar que los desplazamientos están expresados en mm, y que los ejes se definen positivos hacia arriba y hacia la derecha.

Tal y como se puede apreciar en la siguiente *Figura 28*, el gráfico tiene un aspecto muy similar al de la *Figura 20*, donde las zonas azuladas sufren un ligero desplazamiento negativo, las rojizas un ligero desplazamiento positivo y las verdes apenas presentan variación en su posición durante el proceso.

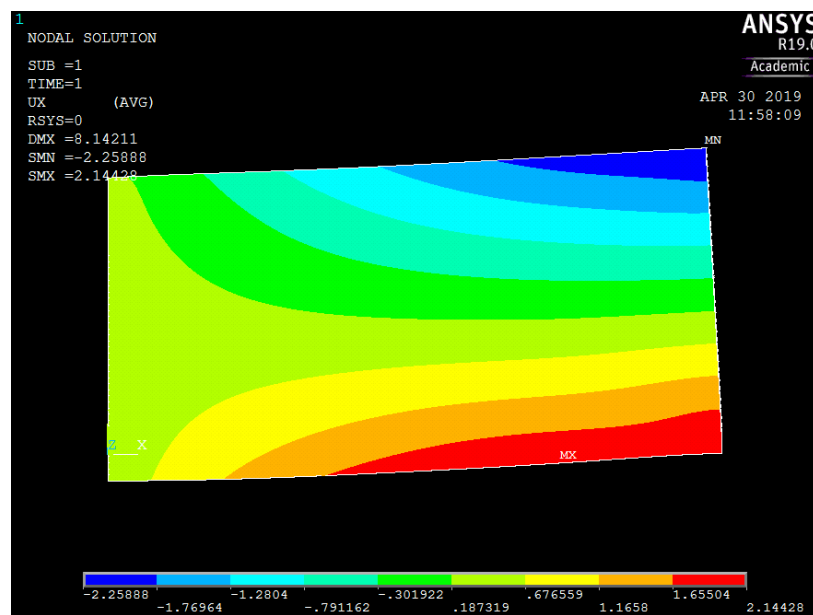


Figura 28. Campo de desplazamiento de la pieza en el eje x obtenido con ANSYS APDL

Por otro lado, igual que en la Figura 21, en la Figura 29 se puede apreciar como todos los puntos tienen un desplazamiento en el eje y, ya que es la dirección donde se aplica la fuerza, y éste es negativo para la gran mayoría de ellos. Además, se observa que contra más a la izquierda está situado un punto más desplazamiento presenta, y contra más a la derecha más fijo está. Esto es lógico, ya que a la izquierda del todo se sitúa el punto medio de la pieza, lugar donde es aplicada la fuerza en el ensayo, y a la derecha se ubica el apoyo.

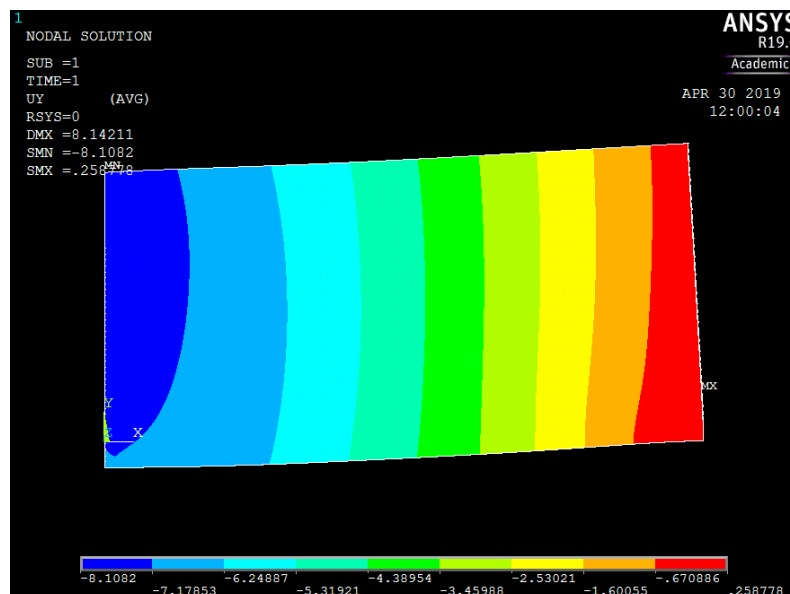


Figura 29. Campo de desplazamiento de la pieza en el eje y obtenido con ANSYS APDL

Por último, la *Figura 30* y la *Figura 31*, son los gráficos de las deformaciones en ambos ejes, los cuales no presentan tan claramente como en el caso de los desplazamientos una similitud tan grande respecto a los obtenidos con GOM. Sin embargo, si se analizan los valores estos son considerablemente similares. Igual que en el caso del GOM, las zonas azuladas representan deformaciones negativas y las rojizas positivas, siendo las verdosas zonas con menos deformación.

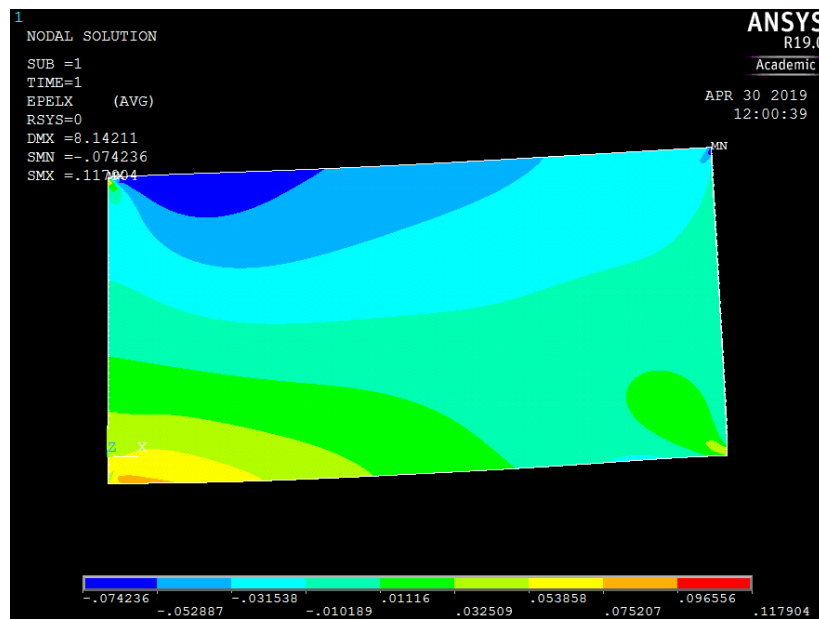


Figura 30. Deformación de la pieza en el eje x obtenida con ANSYS APDL

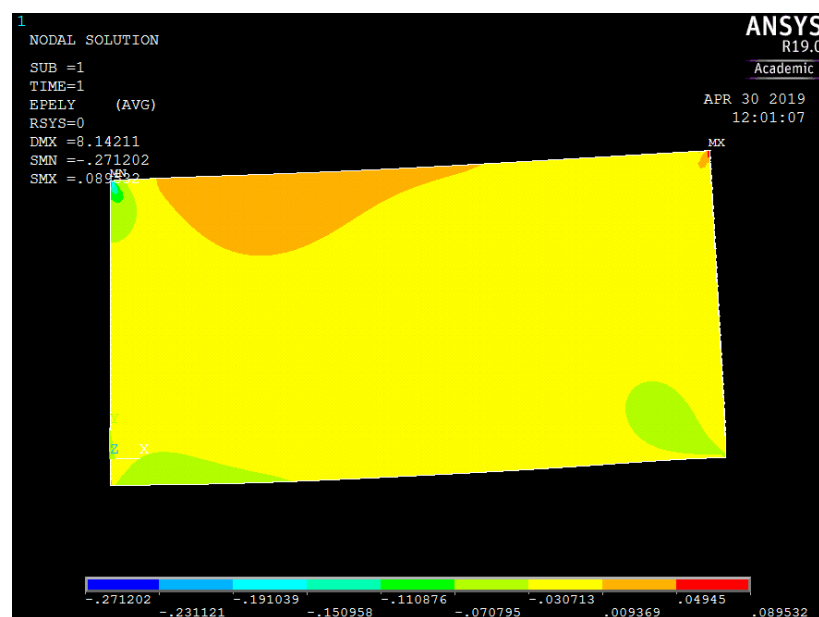


Figura 31. Deformación de la pieza en el eje y obtenida con ANSYS APDL

4.3.2. Simulación en ANSYS Workbench

Para poder trabajar con ANSYS Workbench, lo primero que se ha de hacer es importar el modelo externo creado en ANSYS APDL, de donde se aprovecha la geometría y el mallado, tal y como se puede ver en la *Figura 32*.

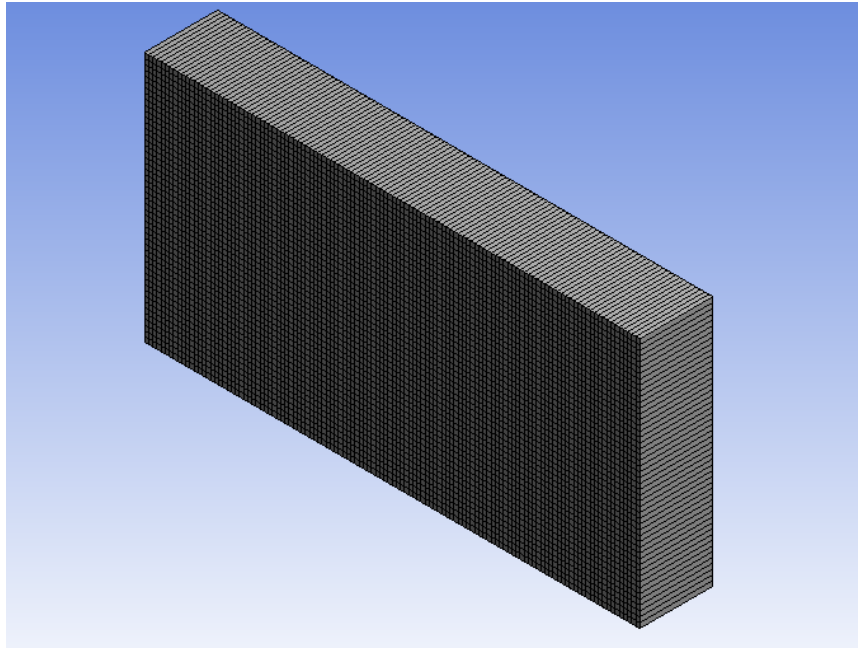


Figura 32. Geometría y mallado de la pieza en ANSYS Workbench

A continuación, se deben imponer diferentes condiciones de contorno, tal y como se muestra en la siguiente *Figura 33*. Se deben fijar los desplazamientos de la cara lateral izquierda, que es la que está en contacto con la otra mitad de la pieza, en el eje x. Esto se realiza para simular el comportamiento simétrico de la pieza, donde esa zona es la que más desplazamiento vertical experimenta, pero apenas sufre desplazamiento en el eje x. Además, esto se realiza para asegurar que la simulación estudia el comportamiento del modelo teniendo en cuenta toda la pieza, a pesar de que para simplificar, tal y como se ha dicho en pasos anteriores, en ANSYS solo se ha trabajado con la mitad derecha. Por otro lado, se buscan los dos nodos que sufren los menores desplazamientos en el eje y, uno en la cara frontal delantera y el equivalente en la trasera, ambos situados casi a la derecha del todo, y que simulan ser los apoyos utilizados durante el ensayo de la pieza.

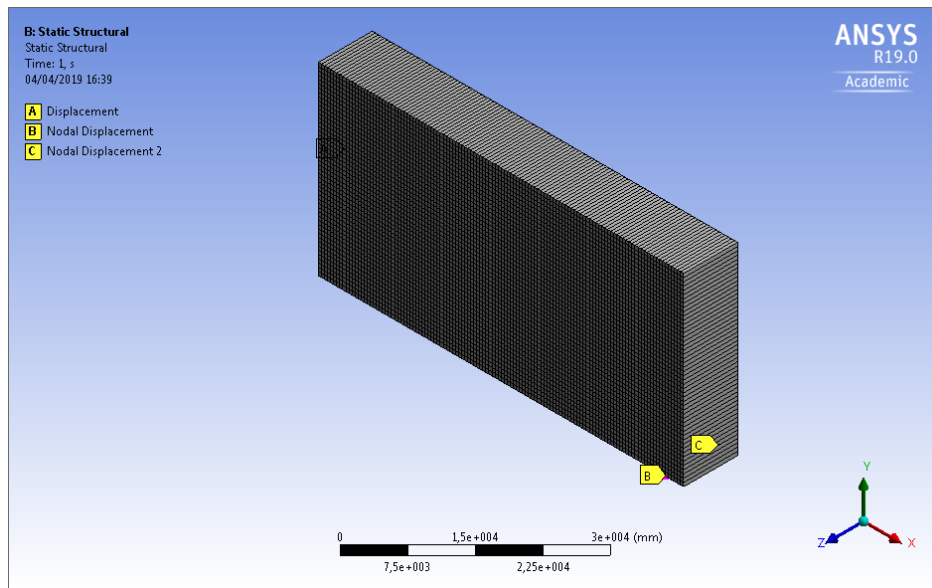


Figura 33. Geometría y mallado de la pieza en ANSYS Workbench

Después, se han añadido los comandos necesarios que permiten aplicar las fuerzas que originan los desplazamientos de la pieza. Estas fuerzas se han extraído de ANSYS APDL, y tras ser pasadas por una macro de Matlab que permite adaptar los datos que se poseen para ser utilizados en Workbench, se ha obtenido una solución de nuestro problema. Además, dentro del mismo apartado Static Structural, se permite la obtención de los gráficos deseados. En nuestro caso, en la *Figura 34* se muestra el gráfico de la distribución de tensiones de Von-Mises, donde aparentemente se observan tensiones mínimas por toda la pieza, excepto en las zonas próximas al punto de aplicación de la fuerza o en zonas próximas a los apoyos. Por otro lado, la *Figura 35* muestra el gráfico de los desplazamientos totales de la pieza, donde se puede apreciar claramente que los puntos más cercanos al punto de aplicación de la fuerza experimentan un mayor desplazamiento, mientras que los puntos más cercanos al apoyo se desplazan menos. Estas afirmaciones son las mismas que las ya mencionadas cuando se analizaban las partes de DIC o APDL.

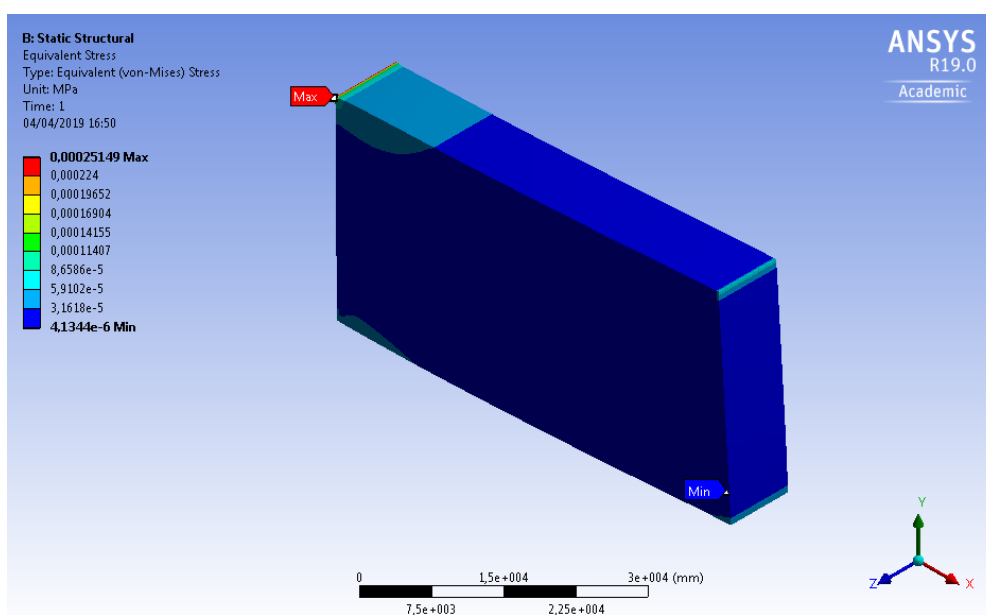


Figura 34. Tensión de Von-Mises de la pieza obtenida con ANSYS Workbench

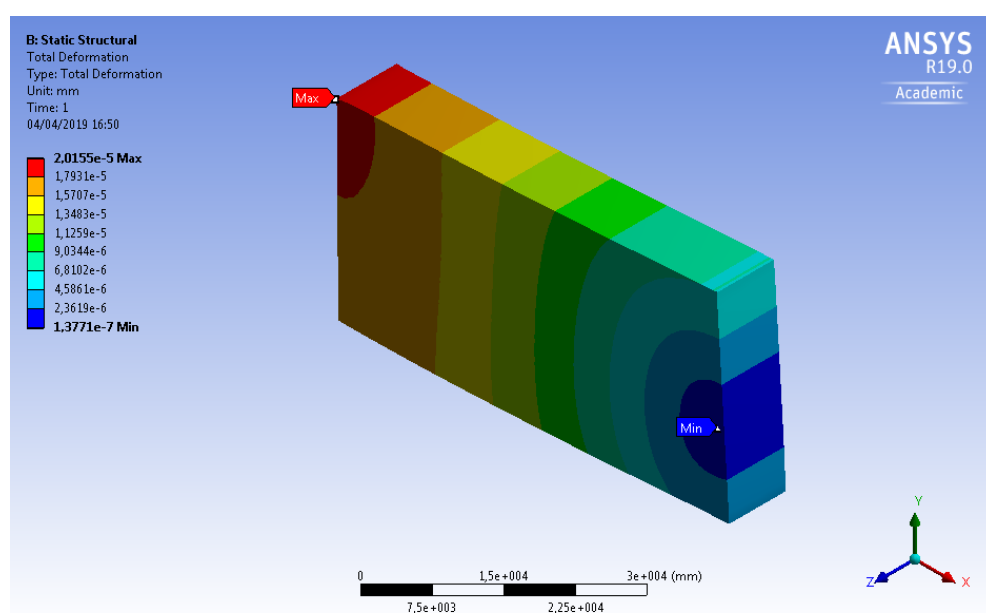


Figura 35. Desplazamiento total de la pieza obtenido con ANSYS Workbench

4.4. Optimización topológica en ANSYS Workbench

En la siguiente *Figura 36*, se muestra el flujo del proceso realizado en ANSYS Workbench, donde aparece la optimización topológica como último punto de este proyecto.

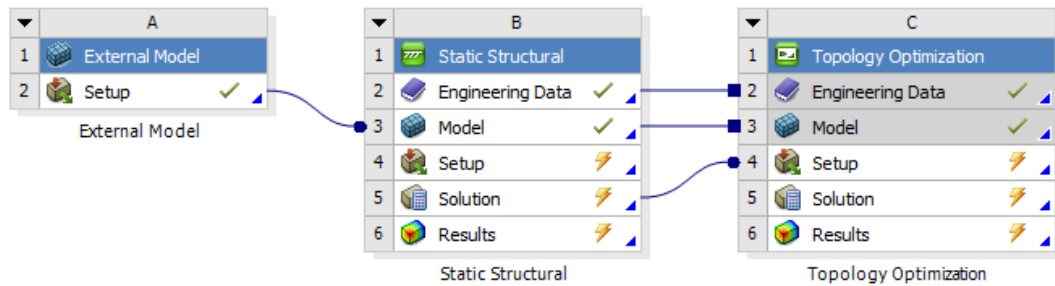


Figura 36. Flujo del proceso realizado en ANSYS Workbench

Después de haber comprobado en numerosas ocasiones que en Workbench la optimización topológica funciona obligatoriamente con la aplicación de fuerzas, se procede a resolver el problema, teniendo éste el aspecto de la *Figura 37*.

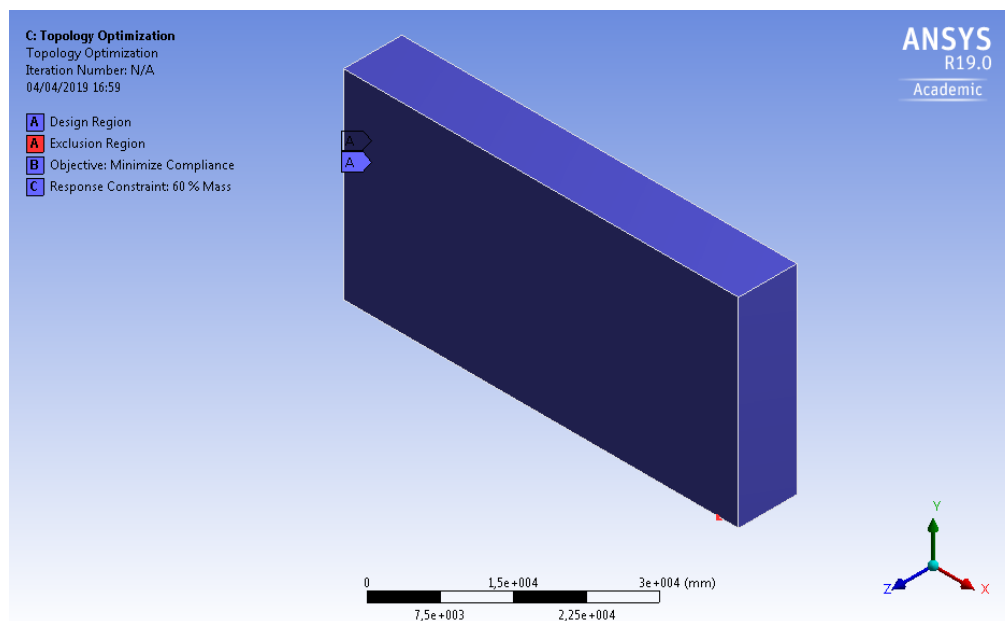


Figura 37. Optimización topológica en ANSYS Workbench

En la optimización topológica, el parámetro habitual que se suele cambiar es el porcentaje de masa inicial que se desea conservar. Este método distribuye la densidad de la pieza de la forma más óptima posible para reducir la masa, a la vez que se intenta mantener al máximo el comportamiento mecánico ante unas fuerzas aplicadas. En las siguientes figuras (*Figura 38*, *Figura 39* y *Figura 40*) se puede apreciar el aspecto de la pieza final optimizada reduciendo la masa un 60%, 50 % y 40% respectivamente. Se ha optado por estas reducciones porque representan cifras normales. Por ejemplo, en el caso real explicado en la parte teórica de este proyecto, la pieza final tiene un 53% menos de peso que la pieza inicial.

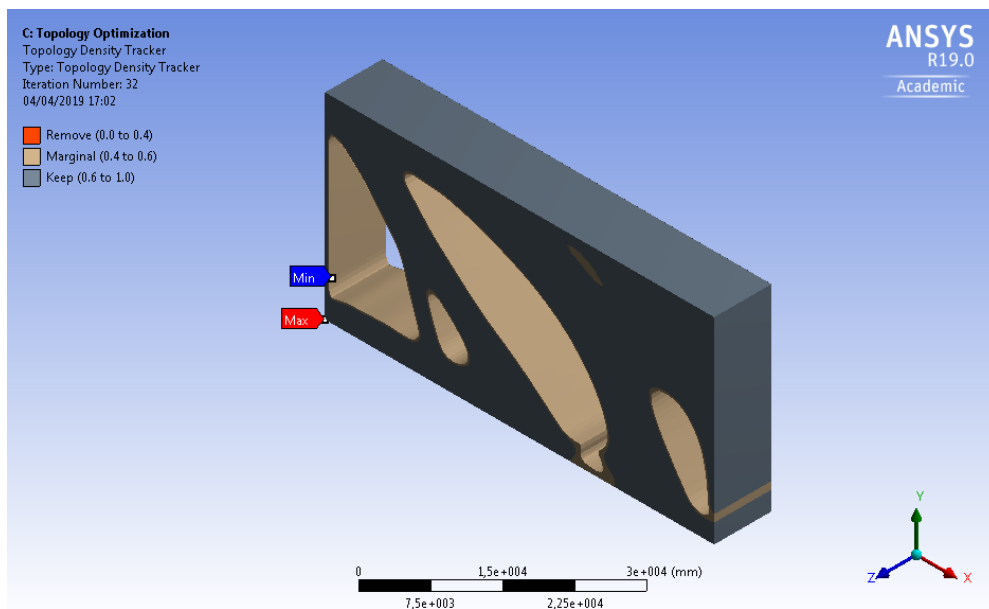


Figura 38. Pieza optimizada en ANSYS Workbench manteniendo el 60% de la masa

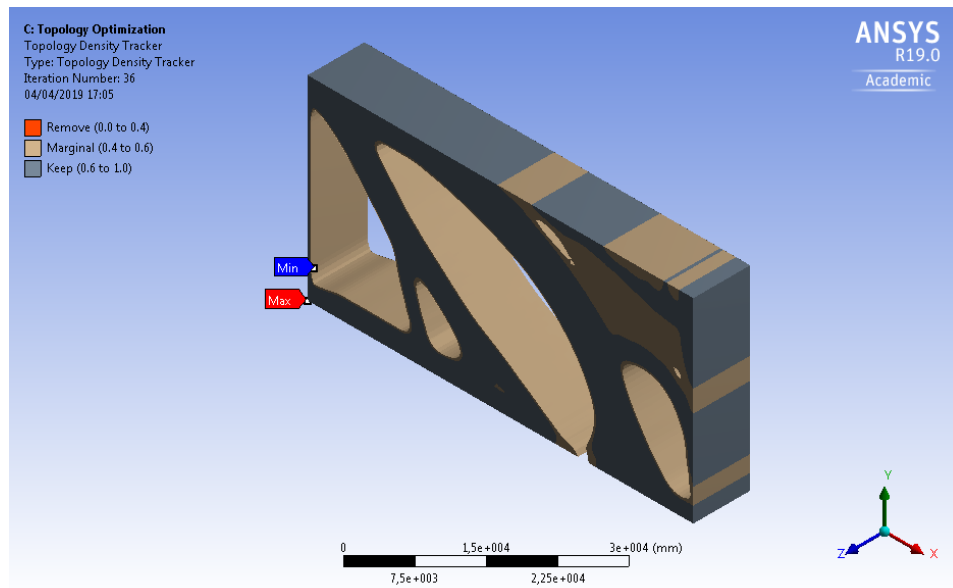


Figura 39. Pieza optimizada en ANSYS Workbench manteniendo el 50% de la masa

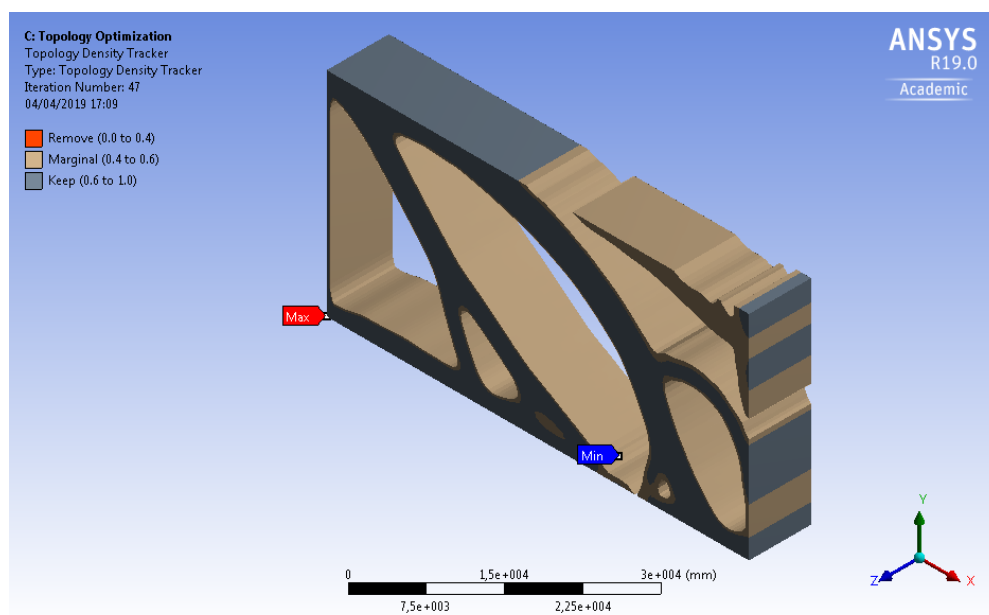


Figura 40. Pieza optimizada en ANSYS Workbench manteniendo el 40% de la masa

Para futuras líneas de trabajo acerca de este proyecto, se pueden comparar los resultados que se obtienen cuando se realiza la optimización topológica de la forma habitual y cuando se realiza de forma más experimental, tal y como se ha hecho en este trabajo. También es una buena idea buscar aplicaciones reales para utilizar este tipo de optimización, que pueden ser casos donde las condiciones de aplicación de las fuerzas y de los apoyos son más determinantes, o casos en los que la geometría es compleja. Además, cabe indicar que los resultados en la optimización topológica no son los diseños que se envían a producir mediante fabricación aditiva, ya que se han de suavizar las curvas, eliminar algunos trozos de material, regular la forma de los agujeros, etc. Es por eso que también es interesante estudiar la variación de las tensiones y deformaciones en el diseño final de la pieza optimizada antes y después de aplicarse esta serie de modificaciones. Por último, el otro caso de interés que se me ocurre, es buscar el porcentaje exacto de masa a reducir para obtener un diseño óptimo. En la siguiente *Figura 41* se observa un ejemplo típico de la literatura de optimización topológica, y en futuros proyectos sería interesante acercarse a esa geometría realizando los cambios pertinentes, que me consta que ya se está trabajando en ellos.

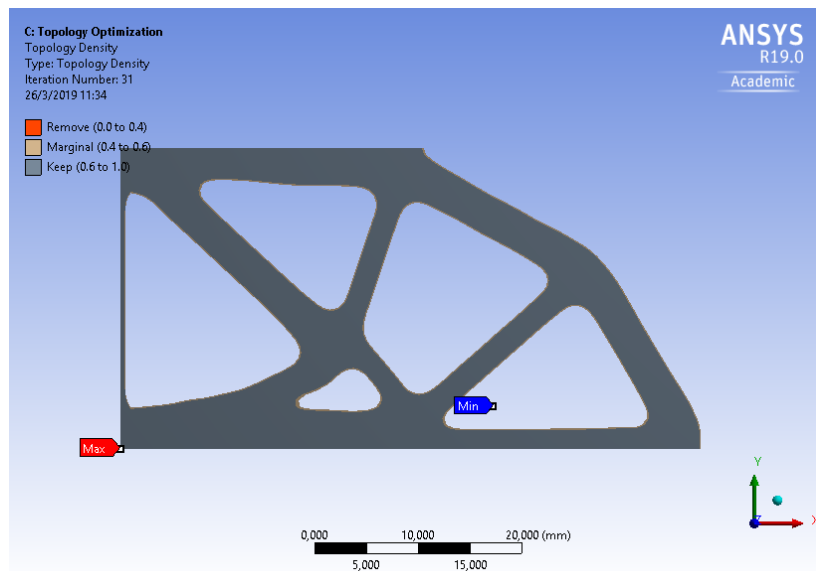


Figura 41. Ejemplo típico de optimización topológica obtenido con ANSYS Workbench

Conclusiones

Tal y como se ha visto en el proceso de este trabajo, el método de optimización topológica utilizado por ANSYS Workbench siempre requiere la utilización de fuerzas. La idea original de realizar la optimización topológica a partir de las tensiones y deformaciones provocadas por los desplazamientos impuestos no es aplicable. En su lugar, se han utilizado las fuerzas de reacción, que son equivalentes a las fuerzas provocadas por los desplazamientos impuestos, pero de signo contrario. Cabe destacar que no ha sido tarea fácil llegar a obtener estas reacciones, por lo que ha sido sin duda uno de los principales enigmas a resolver en este proyecto.

Primero de todo, de la fabricación aditiva tipo DLP se puede decir que se trata de una forma de producir piezas, principalmente pequeñas, con un nivel de detalle inigualable y gran velocidad. Este sistema incorpora un proyector que fotopolimeriza selectivamente finas capas de material hasta conseguir la geometría deseada.

En cuanto a la técnica DIC, permite realizar medidas de un modo sencillo para poder estudiar el comportamiento de los materiales en aplicaciones de la vida cotidiana. Compara fotografías de un mismo elemento en diferentes instantes de tiempo, por lo que obtiene campos de desplazamientos y de tensiones de gran precisión. Por tanto, se trata de una técnica a tener muy en cuenta, sobre todo en espacios interiores como el laboratorio, ya que en el exterior puede verse alterada por algunos factores de carácter ambiental especialmente.

En nuestro caso, se ha utilizado el software gratuito de GOM Correlate, el cual nos ha permitido medir los desplazamientos en los puntos deseados del contorno, los cuales determinan el comportamiento del total de la pieza. Destacar también que solo se ha trabajado con la mitad derecha de la pieza para simplificar el problema. Además, apuntar que ha sido un proceso sencillo pero muy lento, por lo que contar con la versión de pago facilitaría considerablemente el proceso. También se ha podido apreciar que la pieza sufría más desplazamientos en el eje y, ya que es el único eje donde se aplica una fuerza.

En cuanto a la optimización topológica, es un método que consiste en el aligeramiento estructural manteniendo al máximo la rigidez. Es bastante frecuente encontrar casos de optimización topológica en los que se usa el DIC para validar los resultados. Sin embargo, es más difícil hallar situaciones en las que el DIC se utiliza como paso previo a la optimización. En nuestro caso, la técnica DIC se ha utilizado para obtener los desplazamientos y posteriormente las fuerzas de reacción en los diferentes puntos de la pieza.

Por último, se utilizan los softwares de ANSYS, primero el APDL para obtener el mallado de la pieza y una simulación realista de los desplazamientos, y luego ANSYS Workbench, desde donde es posible aplicar las fuerzas de reacción obtenidas gracias a los desplazamientos y así poder optimizar topológicamente la pieza. Entonces, por último, teniendo claro que Workbench necesita obligatoriamente el uso de fuerzas, en nuestro caso de reacción, para realizar la optimización topológica, y aplicando correctamente las condiciones de contorno, es posible obtener nuestra pieza optimizada, conservando el porcentaje de masa deseado.

Bibliografía

- [1] DrDalyo (2017, 4 junio) ANSYS 18.1 Topology Optimization [Vídeo] <https://www.youtube.com/watch?v=PMcP7mK1Zec&t=626s&pbjreload=10>
- [2] GEBISA, A.W. and H.G. Lemu. *A case on topology optimized design for additive*. Materials Science and Engineering 2017; 276
- [3] NATURAL ROBOTICS (2016, 2 junio) *Las tres tecnologías base de impresión 3D [web]* <https://natubots.com/las-tres-tecnologias-base-impresion-3d/>
- [4] Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2016, 28 abril) *Impresión 3D y la fabricación aditiva* [Vídeo] <https://www.youtube.com/watch?v=HxuAULPsK-M>
- [5] Andrew T.Cullen, Aaron D.Price. *Digital light processing for the fabrication of 3D intrinsically conductive polymer structures*. Synthetic metals 235 (2018)34-41
- [6] Güerri, A. *Optimització topològica d'elements estructurals simples fabricats amb la tècnica del Digital Light Processing*. Barcelona, septiembre 2018
- [7] CHUANG, Ching-Hung, Shikui Chen, Ren-Jye Yang and Panagiotis Vogiatzis *Topology optimization with additive manufacturing consideration for vehicle load path development*. Wiley Online Library. Marzo 2017
- [8] Oñate, Eugenio. *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos: análisis elástico lineal*. Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1995
- [9] Bendsøe, M.P. and O. Sigmund. *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer Science & Business Media, 2003
- [10] Dr Nick McCormick and Dr Jerry Lord. *Digital Image Correlation*. Materials today. December 2010, volume 13, number 12.
- [11] Matthew E. Lynch, Matthew Mordasky, Lin Cheng, Albert To. *Design, testing, and mechanical behavior of additively manufactured casing with optimized lattice structure*. Additive Manufacturing 22 (2018) 462-471
- [12] Casafont, Miquel. *Topology Generation of Structures and Other Mechanical Elements*. Barcelona, Febrer 1995